

David Wiegmann

Entwicklung und Evaluation eines Graspable User Interface für ein arbeitswissenschaftliches digitales Menschmodell

SSE-Dissertation 18

Entwicklung und Evaluation eines Graspable User Interface für ein arbeitswissenschaftliches digitales Menschmodell

D i s s e r t a t i o n

zur Erlangung des Doktorgrades
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von
David Wiegmann
aus Gifhorn

genehmigt von der
Fakultät für Mathematik/Informatik und Maschinenbau
der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung

10.12.2018

Dissertation Clausthal, SSE-Dissertation 18, 2018

Dekan

Prof. Dr.-Ing. Volker Wesling

Vorsitzende/Vorsitzender der Promotionskommission

Prof. Dr. Christian Siemers

Betreuer

Prof. Dr. Andreas Rausch

Gutachter

Prof. Dr.-Ing. Holger Brüggemann

Prof. Dr.-Ing. Michael Prilla

Kurzfassung

In der Vergangenheit führten zunehmende marktbeeinflussende Anforderungen dazu, dass der Produktionsplanungs- und Gestaltungsprozess von Unternehmen in immer kürzerer Zeit und teilweise parallel zum Produktentwicklungsprozess bewältigt werden muss. Hieraus resultierend hat sich der Einsatz von Methoden und Werkzeugen der Digitalen Fabrik fest im Produktionsplanungsprozess etabliert.

Trotz vieler Vorteile findet die ergonomische Abbildung des Menschen in der Digitalen Fabrik im Vergleich zu anderen Methoden bisher weniger Beachtung. Studien zeigen, dass der größte Nachteil des Einsatzes digitaler arbeitswissenschaftlicher Menschmodelle der hohe zeitliche Bedienungsaufwand ist. Ein Hauptgrund hierfür ist, dass die bisherigen Methoden zur Manipulation der Körperhaltung und der Bewegungsgenerierung häufig keine zufriedenstellenden Lösungen bieten, was das Verhältnis von Aufwand zu Nutzen betrifft.

Eine Möglichkeit, dieses Verhältnis zu verbessern, liegt in dem Einsatz innovativer Benutzerschnittstellen und deren Eingabegeräten. In ähnlichen Anwendungen wurden bereits zur Manipulation digitaler Modelle spezielle Eingabegeräte entwickelt. Diese Eingabegeräte stellen dabei ein physisches Abbild in Form einer Puppe o.ä. des zu kontrollierenden digitalen Modells dar und erleichtern dessen Bedienung.

In dieser Arbeit wird die Entwicklung und Gestaltung eines solchen Eingabegeräts für ein digitales, arbeitswissenschaftliches Menschmodell beschrieben. Das Eingabegerät namens *Human Input Device* wird auf das Menschmodell *Jack* von *Siemens PLM* zugeschnitten.

Im Weiteren wird der Einsatz des Eingabegeräts innerhalb der Ergonomiesimulation im Vergleich zur Maus evaluiert. Als Evaluationsziel dient hierbei die Gebrauchstauglichkeit, deren Spezifikation bei der Manipulation der Körperhaltung eines arbeitswissenschaftlichen Menschmodells beschrieben wird. Hierauf aufbauend werden zwei Nutzerstudien durchgeführt. Eine dieser Nutzerstudien stellt ein Experiment dar, bei dem das Eingabegerät von Laien in einem engen vorgegebenen Rahmen benutzt wird, um die Körperhaltung digitaler Menschmodelle zu kontrollieren. Die Ergebnisse zeigen, dass mit der Eingabepuppe der Zeitbedarf hierfür signifikant geringer ist. In der zweiten Nutzerstudie wird das Eingabegerät anhand von Experten an Beispielen aus der Praxis evaluiert. Hierbei schätzen die Experten ebenfalls überwiegend ein, dass sich die Bedienung beschleunigt, wenn das *Human Input Device* verwendet wird.

Abgeleitet aus den Ergebnissen der Evaluation werden in der Arbeit konkrete Einsatzszenarien der Eingabepuppe sowie Weiterentwicklungspotenziale beschrieben.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt an dieser Stelle Herrn Prof. Dr. Andreas Rausch für die Betreuung dieser Arbeit und seine dafür aufgewendete Zeit sowie für die anregenden Gespräche und Diskussionen.

Ein Weiterer besonderer Dank gebührt Herrn Prof. Dr.-Ing. Holger Brüggemann, unter dessen Leitung ich im korrespondierenden Forschungsprojekt am Institut für Produktionstechnik an der Hochschule Ostfalia als wissenschaftlicher Mitarbeiter gearbeitet habe. Durch ihn konnte ich dort, durch den mir eingeräumten wissenschaftlichen Freiraum, den Großteil der Erkenntnisse dieser Dissertation erarbeiten.

Ebenfalls möchte ich mich bei Prof. Prilla für die Übernahme des Gutachtens bedanken.

Weiterhin bedanke ich mich bei den beteiligten Unternehmen und Personen für die Teilnahme an den Nutzerstudien.

Ein weiterer Dank gilt den Professoren und Mitarbeitern des Instituts für Produktionstechnik für die großartige Zusammenarbeit und angenehme Zeit, die ich dort verbringen durfte.

Ebenfalls möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, die während der Erstellung dieser Arbeit oft auf mich verzichten mussten.

Abschließend bedanke ich mich bei meiner Frau. Ohne Ihre Unterstützung wäre es mir nicht möglich gewesen diese Arbeit zu verfassen.

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Zielsetzung	1
1.2	Aufbau der Arbeit	3
2	Stand der Wissenschaft und Technik	5
2.1	Digitale Fabrik	5
2.1.1	Anwendungsbereich und Vorteile der Digitalen Fabrik	6
2.1.2	Modelle der Digitalen Fabrik	9
2.1.3	Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik	9
2.1.4	Simulation	11
2.2	Ergonomische Abbildung des Menschen in der Digitalen Fabrik	13
2.2.1	Digitale Menschmodelle	15
2.2.2	Aufbau arbeitswissenschaftlicher Menschmodelle	17
2.2.3	Manipulationsfunktionen der Körperhaltung arbeitswissenschaftlicher Menschmodelle	20
2.2.4	Bewegungsgenerierung arbeitswissenschaftlicher Menschmodelle	27
2.2.5	Studien zur Anwendung arbeitswissenschaftlicher, digitaler Menschmodelle	30
2.3	Benutzungsschnittstellen und Eingabegeräte	35
2.3.1	Mensch-Computer-Interaktion und Benutzungsschnittstellen	35
2.3.2	Eingabegeräte	37
2.3.3	Graspable und Tangible User Interfaces	39
2.3.4	Beispiele von Graspable und Tangible User Interfaces zur Manipulation der kinematischen Kette eines digitalen Modells	41
2.4	Zwischenfazit	52
3	Entwicklung und Beschreibung eines Graspable User Interface für ein arbeitswissenschaftliches digitales Menschmodell	57
3.1	Vorbetrachtungen	57
3.1.1	Konzeptentwurf und Anforderungen	57
3.1.2	Analyse Jack	59
3.2	Aufbau und Entwicklung	64
3.2.1	Ableitung Skelett	64
3.2.2	Auswahl Sensorik	66
3.2.3	Mechanische Gestaltung und Konstruktion	67
3.2.4	Beschreibung der Schnittstelle	70
3.2.5	Bedienung und Funktion	75

4	Evaluation	81
4.1	Vorbetrachtung	81
4.1.1	Auswahl der Gebrauchstauglichkeit als Evaluationsziel	81
4.1.2	Evaluation der Gebrauchstauglichkeit	84
4.1.3	Gebrauchstauglichkeit des <i>Human Input Device</i> zur Bewegungserzeugung eines arbeitswissenschaftlichen Menschmodellen.....	86
4.2	Nutzerstudie zur Manipulation der Körperhaltung von Menschmodellen.	89
4.2.1	Studiendesign	89
4.2.2	Studiendurchführung	96
4.2.3	Studienauswertung	99
4.2.4	Fazit der ersten Nutzerstudie	104
4.3	Nutzerstudie zur eingebetteten Anwendung des Human Input Device bei der Ergonomiesimulation.....	106
4.3.1	Studiendesign	106
4.3.2	Studiendurchführung	110
4.3.3	Studienauswertung	116
4.3.4	Fazit der zweiten Nutzerstudie.....	121
5	Einsatzszenarien und Weiterentwicklungspotentiale.....	123
5.1	Einordnung des Human Input Device in den Planungsprozess und in die Methoden der Bewegungsgenerierung	123
5.1.1	Desktop-Methoden vs. Motion Capturing	124
5.1.2	Eingliederung der Eingabepuppe in die Desktop-Methoden zur Bewegungsgenerierung	127
5.2	Einsatzszenarien.....	129
5.2.1	Keyframing.....	130
5.2.2	Modifikation aufgabenbasiert definierter Bewegungen	133
5.2.3	Änderung von auf Basis von Motion Capturing erstellter Bewegungen.....	135
5.2.4	Einsatz in Workshops und Besprechungen.....	138
5.3	Weiterentwicklungspotentiale.....	139
5.3.1	Verwendung von Kugelgelenken	139
5.3.2	Ausstattung des Human Input Device Antrieben an den Gelenken.	140
5.3.3	Erweiterung des Human Input Device zu einem Tangible User Interface.....	145
6	Zusammenfassung und Fazit	149
	Literaturverzeichnis	151
	Abbildungsverzeichnis.....	159

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung

Die deutsche Bevölkerung unterliegt dem demographischen Wandel und wird tendenziell immer älter. Nach einer Bevölkerungsvorausberechnung bis zum Jahre 2060 des statistischen Bundesamts (Statistisches Bundesamt, 2015) nimmt der Median der Erwerbstätigen im Alter bei allen zugrundeliegenden Szenarien zu und führt dabei den derzeitigen Trend fort (siehe Abbildung 1.1). Darüber hinaus ergibt die Vorausberechnung, dass die Zahl der Erwerbstätigen von derzeit 49 Millionen auf 34 bis 38 Millionen abnimmt¹.

Diese Entwicklung hat große Auswirkung auf die Planung und Gestaltung manueller Arbeitsplätze produzierender Unternehmen. Die Unternehmen müssen zum einen darauf reagieren, dass ihre Belegschaft immer älter wird und zum anderen, dass die Zahl der potenziellen Arbeitnehmer abnimmt. Nicht zuletzt deshalb müssen die Arbeitsplätze und Prozesse ergonomisch so gestaltet werden, dass sie einerseits für ältere Menschen geeignet sind und andererseits, dass diese dem Menschen langfristig nicht schaden und deren Leistungsfähigkeit dauerhaft erhalten.

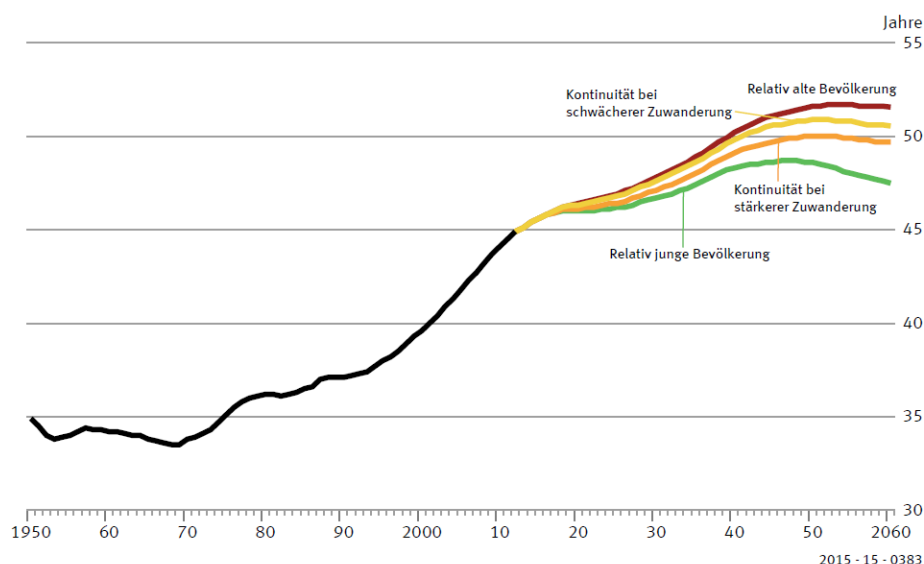


Abbildung 1.1: Medianalter der Erwerbstätigen von 1950 bis 2060 (20 bis 64 jährig, ab 2014 koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung) (Statistisches Bundesamt, 2015)

Die produzierenden Unternehmen und insbesondere die Automobilhersteller reagieren bereits auf diesen Trend und setzen zunehmend die ergonomische Gestaltung von Arbeitsplätzen in

¹ 34 Millionen bei schwächerer Zuwanderung, 38 Millionen bei stärkerer Zuwanderung (Für die zugrundeliegenden Annahmen der Berechnung siehe Statistisches Bundesamt, 2015)

den Fokus, indem sie Methoden zur ergonomischen Bewertung von Arbeitsplätzen, wie etwa dem *Ergonomic Assessment Worksheet (EAWS)*, durchgehend anwenden. Darauf aufbauend lassen sich manuelle Arbeitsplätze analysieren und optimieren. Bei neuen, zukünftigen Arbeitsplätzen erfolgen die Bewertungen über diese sogenannten *Pen & Paper-Methoden*, allerdings tendenziell relativ spät im Produktionsplanungs- und Gestaltungsprozess auf Basis von Beobachtungen durch Versuche an realen Prototypen. Durch die späte Bewertung sind die Möglichkeiten aus ergonomischer Sicht, Einfluss auf das Produkt oder die Betriebsmittel zu nehmen, begrenzt, da Änderungen u.U. zu hohe Kosten verursachen oder aus terminlichen Gründen nicht mehr möglich sind.

Eine Möglichkeit, bereits frühzeitig zukünftige manuelle Arbeitsplätze ergonomisch zu bewerten und darauf aufbauend Produkt, Betriebsmittel und den Prozess ergonomisch zu verbessern, bietet der Einsatz von Ergonomiesimulationen. Hier lässt sich durch den Einsatz digitaler Prototypen von Produkt und Betriebsmittel sowie digitaler Menschmodelle nicht nur die Ergonomie verbessern, sondern durch Machbarkeitsuntersuchungen und zeitwirtschaftliche Bewertungen, unter anderem die Planungssicherheit und die Produktivität, erhöhen. Durch Einführung der *Digitalen Fabrik* haben sich bereits viele Methoden der Simulation fest im Produktionsplanungsprozess etabliert. Beispielsweise ist es in der Automobilindustrie heutzutage selbstverständlich, die Planung und Gestaltung der Roboterzellen des Karosseriebaus durch den Einsatz von Robotersimulation abzusichern. Im Verhältnis dazu wird die Ergonomiesimulation, trotz der hohen Potenziale und den sich verschärfenden Rahmenbedingungen, relativ selten angewandt. Es stellt sich hier die Frage nach der Ursache dieser Diskrepanz.

Wer einmal einen praktischen Einblick in die arbeitswissenschaftliche Untersuchung mit einem digitalen Menschmodell erlangen konnte, kann an dieser Stelle sicherlich nachvollziehen, dass die Generierung von statischen Körperhaltungen oder Bewegungen des Menschmodells oft entweder zu unrealistischen Körperhaltungen und Bewegungen führt oder aber sehr viel Zeit und Mühe in Anspruch nimmt. Der biomechanische Aufbau des Menschen und damit einhergehend der Aufbau digitaler arbeitswissenschaftlicher Menschmodelle ist sehr komplex. Diese Modelle besitzen oft mehr als hundert Freiheitsgrade. Grundsätzlich besteht zum einen die Problematik, dass es bisher noch nicht hinreichend zufriedenstellend möglich ist, menschliche Körperhaltungen oder -bewegungen vorherzusagen. Zum anderen werden einzelne Körperhaltungen des Menschmodells mit seinen vielen Freiheitsgraden hauptsächlich mit der Computermaus, die lediglich zwei Freiheitsgrade besitzt, definiert.

In dieser Arbeit soll die Entwicklung eines speziellen Eingabegeräts beschrieben werden, das im Gegensatz zu der Computermaus speziell auf die Bedienung und Kontrolle arbeitswissenschaftlicher, digitaler Menschmodelle zugeschnitten ist. Des Weiteren soll

untersucht werden, ob es mit diesem Eingabegerät möglich ist, die Erstellung von Ergonomiesimulationen zu beschleunigen und zu erleichtern. Hierdurch soll ein Beitrag geleistet werden, um diese im frühen Stadium des Produktionsplanungsprozesses einzusetzen.

1.2 Aufbau der Arbeit

In dieser Arbeit wird zunächst im zweiten Kapitel der themenbezogene Stand der Wissenschaft und Technik beschrieben. Dieser ist thematisch in zwei Themengebiete untergliedert. Er umfasst zum einen den grundlegenden allgemeinen Themenkomplex der Digitalen Fabrik und darauf aufbauend, inwiefern der Mensch ergonomisch in der Digitalen Fabrik abgebildet wird. Zum anderen werden das Themengebiet der Benutzungsschnittstellen und deren Eingabegeräte grundlegend beschrieben. Abschließend wird daraus resultierend in einem Zwischenfazit die wissenschaftliche Fragestellung dieser Arbeit erarbeitet, die die Entwicklung und Evaluation eines Graspable User Interface für die Ergonomiesimulation thematisiert.

Im dritten Kapitel wird die Entwicklung einer solchen Benutzungsschnittstelle beschrieben. Hierbei werden zunächst vorab die Rahmenbedingungen betrachtet. Anschließend wird der Aufbau und die Entwicklung des User Interfaces behandelt.

Das vierte Kapitel thematisiert dann die Evaluation dieses Eingabegeräts. Aufbauend auf Vorbetrachtungen werden das Design, die Durchführung und die Auswertung zweier Nutzerstudien beschrieben. Diese vergleichen das entwickelte Graspable User Interface mit der etablierten mausbasierten Benutzungsschnittstelle.

Im fünften Kapitel werden dann, aufbauend auf der Evaluation, Einsatzszenarien und Weiterentwicklungspotenziale der Benutzungsschnittstelle beschrieben. Hier wird die Anwendung der Benutzungsschnittstelle zunächst in den allgemeinen Planungsprozess manueller Arbeitsplätze eingeordnet. Darüber hinaus wird die Anwendung der Benutzungsschnittstelle zunächst in den allgemeinen Planungsprozess manueller Arbeitsplätze eingeordnet. Im Weiteren werden dann mögliche Weiterentwicklungspotenziale skizziert.

Die Arbeit wird dann im sechsten Kapitel mit einem Fazit abgeschlossen.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

In diesem Kapitel wird zunächst der Themenkomplex der Digitalen Fabrik vorgestellt. Es wird unter anderem aufgezeigt, aus welchen Gründen die Digitale Fabrik entstanden ist, welche Vorteile sie bietet und in welchem Bereich sie angewendet wird. Des Weiteren wird detaillierter dargestellt, inwiefern der Mensch in ergonomischer Hinsicht in der Digitalen Fabrik abgebildet wird. Neben dem grundsätzlichen Aufbau werden zwei wichtige Funktionen von Menschmodellen der Digitalen Fabrik vorgestellt. Dies sind Funktionen zur Änderung der Körperhaltung sowie Funktionen zur Generierung von Bewegungen. Ergebnisse von Studien zur Anwendung von Menschmodellen in der Digitalen Fabrik zeigen anschließend den Häufigkeitsgrad der Nutzung, sowie deren Vor- und Nachteile auf.

Der zweite Themenkomplex, der in diesem Kapitel betrachtet wird, besteht aus den Benutzungsschnittstellen und deren Eingabegeräten. Neben der Erläuterung der Begrifflichkeiten und der historischen Entwicklung der Benutzungsschnittstelle werden zwei spezielle Benutzungsschnittstellen und Anwendungen vorgestellt, deren Interaktion auf greifbaren Eingabegeräten basieren.

In einem Zwischenfazit soll abschließend aus den vorangegangenen Erkenntnissen die wissenschaftliche Fragestellung dieser Arbeit abgeleitet werden.

2.1 Digitale Fabrik

Die Digitale Fabrik entwickelte sich aus den wesentlich veränderten wirtschaftlichen Rahmenbedingungen heraus, denen produzierende Unternehmen ausgesetzt sind. Bedingt durch den Wandel von einem Verkäufer- zu einem Käufermarkt, versuchen diese durch eine Ausweitung der Produktvielfalt und mit kurzen Produktlebenszyklen dem Verdrängungswettbewerb standzuhalten. Dabei agieren sie in einem globalen, volatilen Marktumfeld, in dem das Prognostizieren zukünftiger Entwicklungen immer schwieriger wird und gravierende marktbeeinflussende Ereignisse immer schneller aufeinander folgen. Diese Umstände zwingen die technische Produktionsplanung zur Erfüllung von immer komplexeren und häufiger anfallenden Aufgaben, die in kürzerer Zeit und mit einer höheren Agilität zu bewältigen sind. Die Unternehmen reagierten hierauf mit einem zunehmenden Einsatz von Rechnerunterstützung entlang des Produktentwicklungs- und Produktionsplanungsprozesses, woraus sich die Digitale Fabrik bildete (siehe Abbildung 2.1). (Bracht et al., 2011)

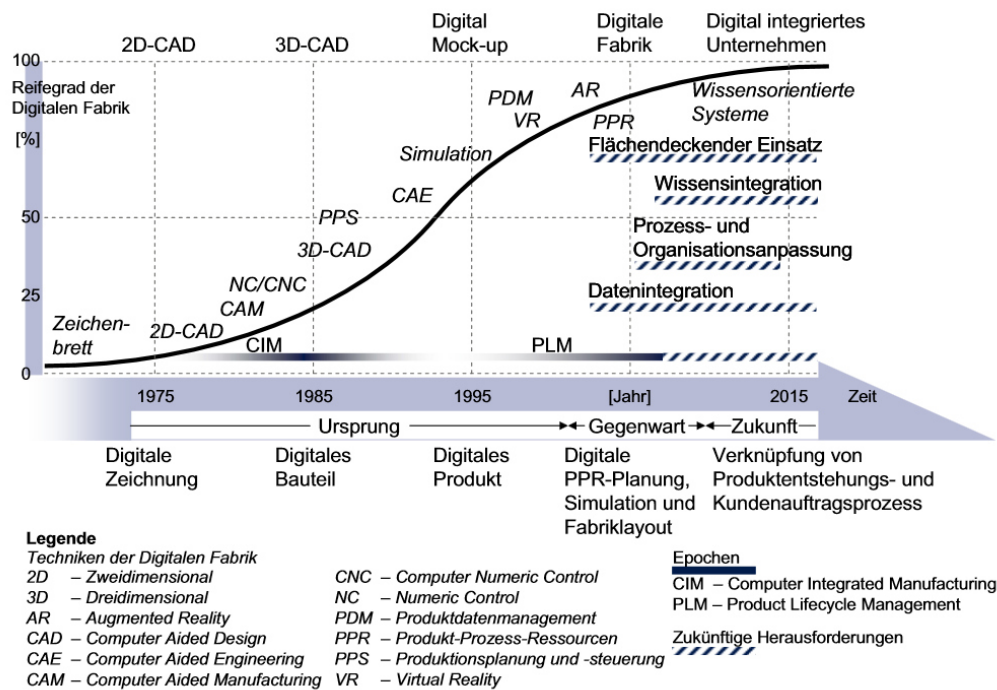


Abbildung 2.1: Evolution der Digitalen Fabrik (in Anl. an Bär, 2004; Faber, 2005; Spur & Krause, 1997; Westkämper, 2006; Wildemann, 2005; Zäh et al., 2005; zit. nach Schack, 2007)

Die VDI Richtlinie 4499 definiert im Blatt 1 den Begriff *Digitale Fabrik* wie folgt:

„Die Digitale Fabrik ist der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen – u. a. der Simulation und der dreidimensionalen Visualisierung – , die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden. Ihr Ziel ist die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt.“ (VDI 4499 Blatt 1)

In den folgenden Unterabschnitten soll zunächst der Anwendungsbereich und die Vorteile der Digitalen Fabrik beschrieben werden. Anschließend wird näher auf die *digitalen Modelle, Methoden und Werkzeuge* sowie auf die *Simulation* eingegangen.

2.1.1 Anwendungsbereich und Vorteile der Digitalen Fabrik

Der Anwendungsbereich der Digitalen Fabrik lässt sich nicht eindeutig abgrenzen, was Abbildung 2.2 recht anschaulich darstellt. Dargestellt ist das Strahlenkreuz aus Produkt- und Produktionsentstehungsprozess sowie des Auftragsabwicklungsprozesses – zwei Kernprozesse produzierender Unternehmen. Hervorgehoben ist der Fokus der Digitalen Fabrik, der im Kern aus der Produktionsplanung und der Gestaltung der Fabrik besteht. Darüber hinaus ist angedeutet, dass die Digitale Fabrik auch mit abnehmender Intensität die angrenzenden Teilprozesse sowie darüber hinausgehende Prozesse betrachtet und damit über

die Gesamtheit der beiden Kernprozesse mit unterschiedlicher Wichtung angewandt wird (VDI 4499 Blatt 1).

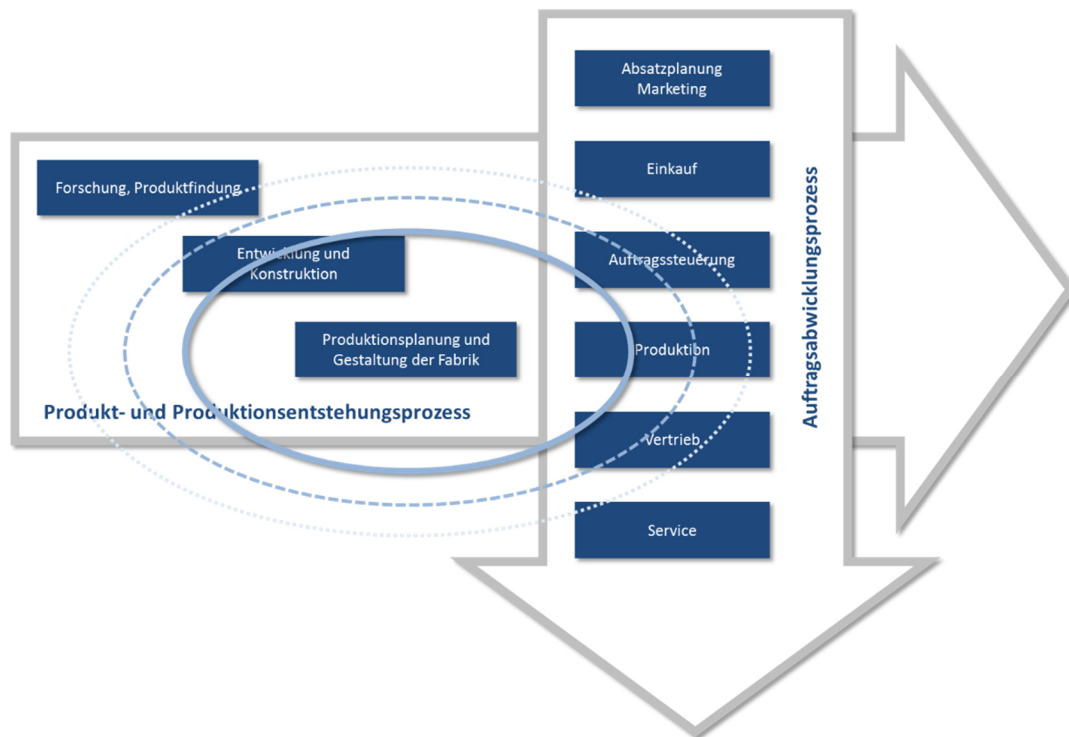


Abbildung 2.2: Fokus der digitalen Fabrik (in Anl. an VDI 4499 Blatt 1)

Die Produktionsplanung und Gestaltung der Fabrik ist kein geradliniger, sondern ein iterativer Prozess, bei dem das Modell des zukünftigen Produktionsprozesses in Schleifen schrittweise angepasst und verbessert wird. Ohne den Einsatz der Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik erfolgt der Schleifendurchlauf größtenteils anhand von Prototypen und in Anlaufphasen der Produktion. Die Vorteile der Digitalen Fabrik ergeben sich in erster Linie aus dem frühzeitigen Vorhandensein eines digitalen Abbildes zukünftiger Produktionsprozesse und -strukturen. Dies führt dazu, dass die Iterationsschleifen schon früher unter Verwendung der digitalen Modelle, Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik durchgeführt werden können, sodass der Planungsaufwand in die früheren Phasen des Produktionsentwicklungsprozesses verlagert werden kann (Abbildung 2.3).

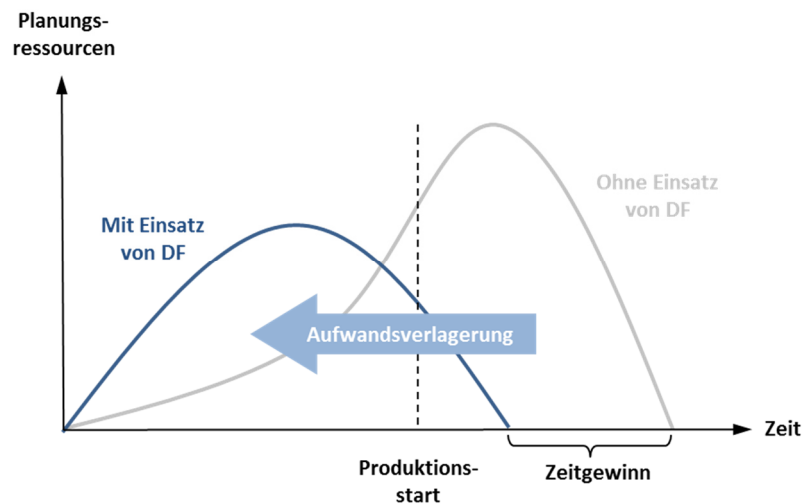


Abbildung 2.3: Aufwandsverlagerung mittels Digitaler Fabrik (in Anl. an Zenner, 2006 und Schenk et al., 2014)

Diese Vorverlagerung des Planungsaufwandes führt unter anderem dazu, dass Planungsfehler früh erkannt und direkt in dieser frühen Phase des Produktionsplanungsprozesses behoben werden können. Diese Fehler würden sonst erst später erkannt und müssten dann zu vielfach höheren Kosten behoben werden. Von großem Vorteil ist ebenfalls, dass durch die verkürzten Planungszeiten Produkte schneller auf den Markt gebracht werden können. Eine detailliertere Auflistung von Vorteilen der Digitalen Fabrik ist in Abbildung 2.4 dargestellt.

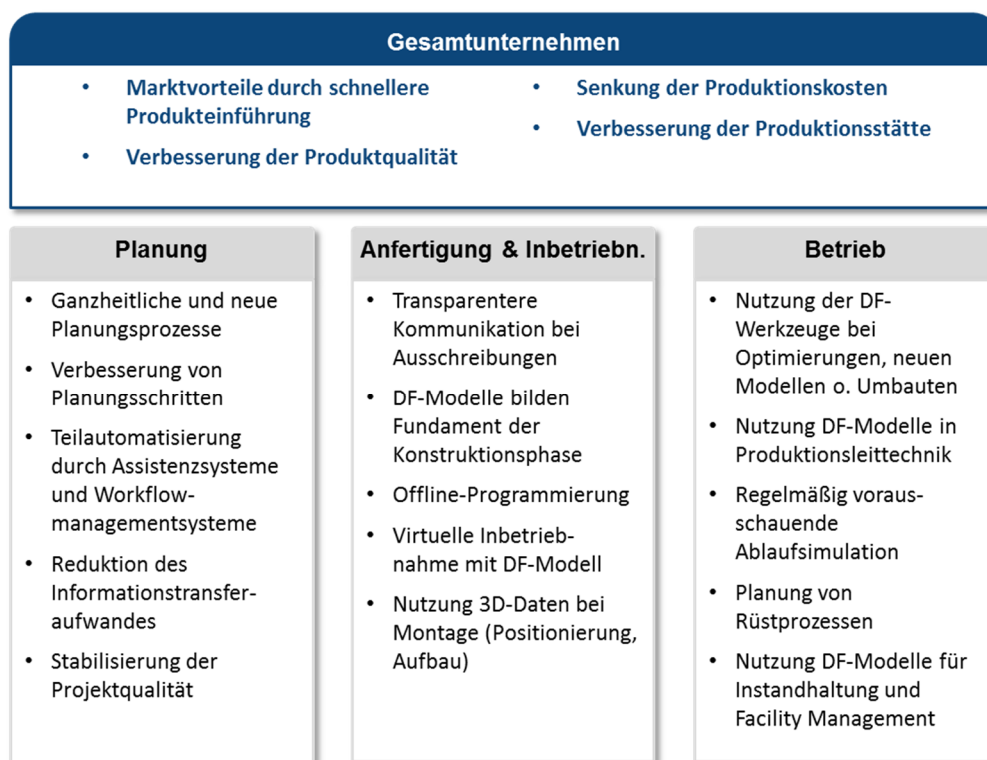


Abbildung 2.4: Vorteile der Digitalen Fabrik (in Anl. an Bracht et al., 2011)

2.1.2 Modelle der Digitalen Fabrik

Der Begriff des *Modells* ist gemäß VDI Richtlinie 3633 Blatt 1 wie folgt definiert:

Ein *Modell* ist eine „vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System.“

In der Digitalen Fabrik werden eine Vielzahl unterschiedlicher Modelle angewendet (Kühn, 2006). Diese haben je nach Einsatzbereich, Modellzweck und Aufgabenstellung unterschiedliche Aspekte, Umfänge und Detaillierungsgrade. Weiterhin gibt es eine grobe Einteilung unterschiedlicher digitaler Modellarten, die in der Digitalen Fabrik eingesetzt werden, gleichwohl es keine vollständige Auflistung und Einteilung aller Modellarten darstellt (Abbildung 2.5).

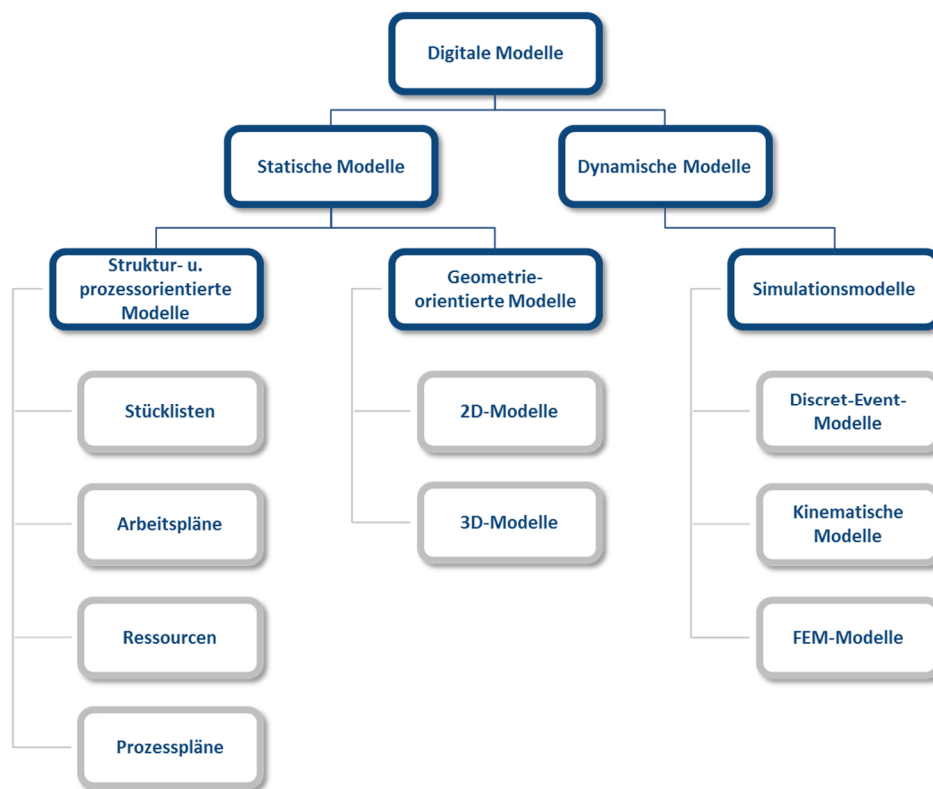


Abbildung 2.5: Klassifikation Digitaler Modelle (in Anl. an Kühn, 2006)

2.1.3 Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik

Die Verwendung der Begriffe *Methode* und *Werkzeug* erfolgt nicht immer eindeutig (Bracht et al., 2011). Es sollen deshalb in dieser Arbeit die Definitionen herangezogen werden, auf die sich auch Bracht et al. (Bracht et al., 2011) beziehen. Für den Begriff der *Methode* wird dabei die Definition von Claus & Schwill (Claus & Schwill, 2006) verwendet:

Eine *Methode* ist eine „systematische zielgerichtete Vorgehensweise, sowie ein durchdachtes Verfahren, welches für eine Vielzahl von Problemen zu einer sinnvollen Lösung führt“

In der Digitalen Fabrik kommt eine Vielzahl unterschiedlicher Methoden zum Einsatz. Genau wie bei den Modellen der Digitalen Fabrik existiert hier keine vollständige Auflistung der einzelnen Methoden. Bracht et al. (Bracht et al., 2011) klassifizieren und beschreiben die für die Praxis relevanten Methoden der Digitalen Fabrik (siehe Abbildung 2.6). Diese Einteilung besitzt jedoch nach Angabe der Autoren keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

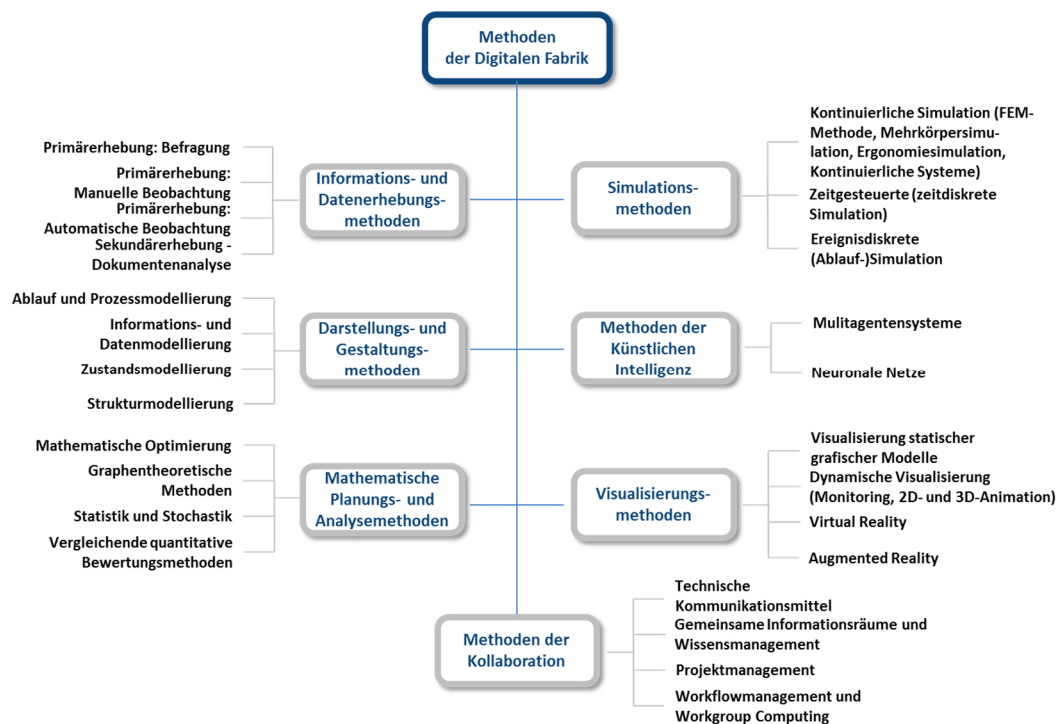


Abbildung 2.6: Klassifizierung der Methoden der Digitalen Fabrik (in Anl. an Bracht et al., 2011)

Den Begriff des *Werkzeugs* definieren Bracht et al. wie folgt:

„Ein IT-gestütztes Werkzeug (Softwareprogramm) stellt die softwaretechnische Implementierung einer Methode oder einer Kombination von mehreren Methoden dar, um diese rechnergestützt einsetzen zu können.“ (Bracht et al., 2011)

Den Einsatz gängiger Werkzeuge der Digitalen Fabrik entlang des Produkt- und Produktionsentstehungsprozesses zeigt Abbildung 2.7

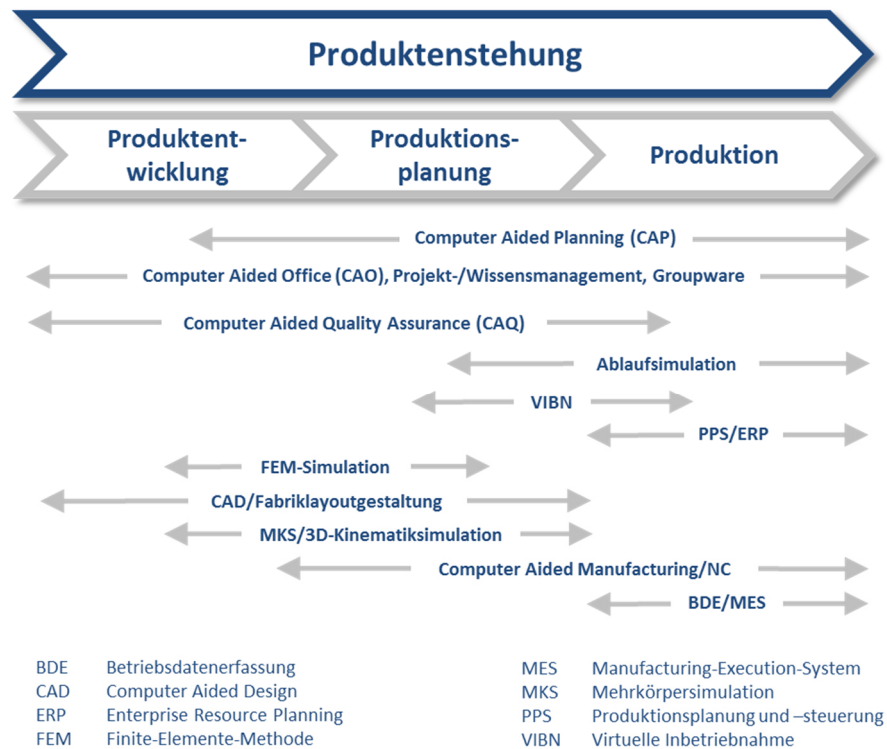


Abbildung 2.7: Werkzeuge der Digitalen Fabrik (in Anl. an Schack, 2007)

2.1.4 Simulation

Neben der dreidimensionalen Visualisierung ist die *Simulation* als Methode der Digitalen Fabrik besonders hervorgehoben und soll auch an dieser Stelle detaillierter betrachtet werden. Die VDI Richtlinie 3633 definiert im Blatt 1 den Begriff der Simulation als das „*Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind, insbesondere werden die Prozesse über die Zeit entwickelt*“. (VDI 3633 Blatt 1)

Law & Kelton (Law & Kelten, 1991) gliedern die Simulation neben weiteren Möglichkeiten ein, um ein System zu untersuchen (Abbildung 2.8). Anhand dieser Eingliederung lässt sich gleichzeitig ableiten, unter welchen Umständen der Einsatz von Simulation sinnvoll ist. Möchte man Erkenntnisse aus einem System erlangen, so gibt es zum einen grundlegend die Möglichkeit, direkt an diesem System zu experimentieren. Im Produktionsplanungsprozess ist dies allerdings häufig nicht möglich, was u.a. folgende Gründe haben kann:

- Bei dem gegenwärtigen System handelt es sich um ein geplantes System, das real noch nicht existiert.
- Das Experimentieren am realen System führt zur Reduktion der Ausbringung bzw. gefährdet die Ausbringung
- Das Experimentieren führt zu unverhältnismäßig hohem zeitlichen und/oder finanziellen Aufwand
- Der Einfluss auf die Variablen des realen Systems ist begrenzt oder diese lassen sich nicht messen

Ist das Experimentieren am gegenwärtigen System nicht möglich, besteht die Möglichkeit, stattdessen ein Modell des Systems zu untersuchen. Dieses Modell kann entweder physikalischer oder mathematischer Natur sein. Ein Beispiel für ein Experimentieren an einem physikalischen Modell im Produktionsplanungsprozess ist das so genannte „Cardboard Engineering“, bei dem Modelle manueller Arbeitsplätze zunächst aus Pappkartons aufgebaut und optimiert werden, ehe sie später im realen Produktionsprozess integriert werden (Hagen, 2010). Auf Basis mathematischer Modelle können Lösungen vorzugsweise analytisch erlangt werden, was häufig jedoch nur bei einfachen Modellen möglich ist. Bei vielen komplexeren Modellen lassen sich dann Erkenntnisse über das System nur noch aus der Simulation ableiten, da sie analytisch nicht mehr lösbar sind (Möller, 1992).

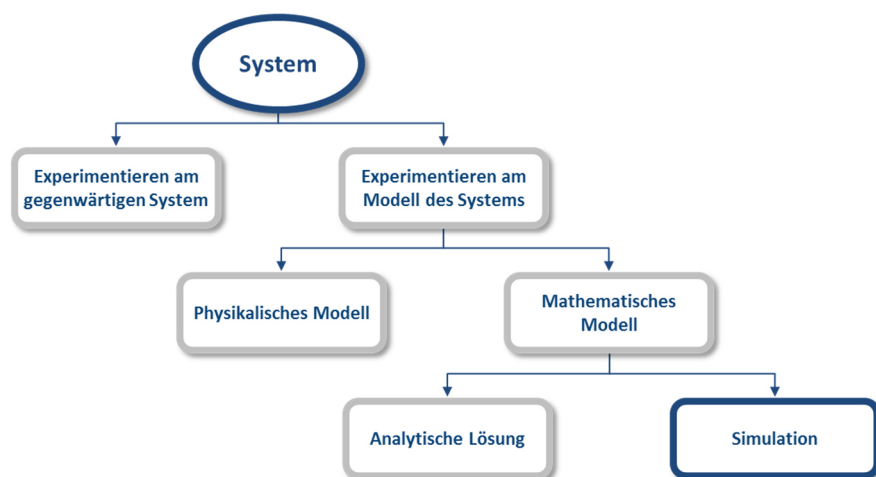


Abbildung 2.8: Wege ein System zu untersuchen (nach Law und Kelton, 1991)

Law & Kelton (Law & Kelton 1991) klassifizieren die Simulationsmodelle anhand folgender Beschreibungsdimensionen:

- Statische² vs. dynamische Modelle
- Deterministisch vs. stochastische Modelle
- Kontinuierliche vs. diskrete Modelle

Anhand des eingesetzten Simulationsmodells lassen sich auch die verschiedenen Simulationsarten unterscheiden. Bracht et al. (Bracht et al., 2011) ordnen die für die Praxis relevanten Simulationsarten in kontinuierliche, zeitgesteuerte (zeitdiskrete) und in ereignisdiskrete (Ablauf-)Simulation ein (Abbildung 2.6).

Bei der kontinuierlichen Simulation wird das zu untersuchende System mit (partiellen) Differentialgleichungen bzw. Differentialgleichungssystemen beschrieben, bei denen sich der Zustand des Systems stetig mit der Zeit verändert. Gelöst werden diese Gleichungen bzw. Gleichungssysteme häufig mithilfe numerischer, diskretisierender Verfahren. Zu den kontinuierlichen Simulationen zählen u.a. die FEM-Simulation, die Mehrkörpersimulation, die Ergonomiesimulation und die Simulation kontinuierlicher Systeme. Bei der zeitgesteuerten (zeitdiskreten) Simulation werden die Zustandsänderungen eines Systems nach Erhöhung der Simulationszeit um ein konstantes Zeitinkrement Δt vorgenommen. Im Produktionsplanungsprozess kommen zeitdiskrete Simulationen, z.B. bei der Untersuchung von logistischen Stoff- oder Energieströmen, vor. Bei der ereignisdiskreten (Ablauf-)Simulation hingegen werden die Zustandsänderungen nicht nach konstanten Zeitabständen, sondern durch Ereignisse ausgelöst, die mit einem Zeitstempel versehen sind und in einer Ereignisliste verwaltet werden. Die Simulationszeit wird bei der Abarbeitung der Ereignisse entsprechend der korrespondierenden Zeitstempel gesetzt. Die ereignisdiskrete bzw. Ablaufsimulation wird zur Untersuchung von Material- und Informationsflüssen, Produktionsprozessen und der Beschaffungs- und Distributionslogistik eingesetzt. (Bracht et al., 2011)

2.2 Ergonomische Abbildung des Menschen in der Digitalen Fabrik

In der VDI-Richtlinie 4499 zur Digitalen Fabrik wird im Blatt 4 die ergonomische Abbildung des Menschen in der Digitalen Fabrik beschrieben. Dessen *„Gegenstandsbereich ist dabei die digitale Modellierung von Arbeitspersonen im Zusammenwirken mit Arbeitsgegenständen und Arbeitsmitteln in einer Arbeitsumgebung. ... Dies dient dem Zweck Arbeitssysteme unter*

² Im Gegensatz zur Definition der Simulation nach VDI 3633 Blatt 1 umfasst nach Law und Kelton (Law & Kelton, 1991) die Simulation auch die Untersuchung statischer Modelle

ergonomischen, arbeitsmethodischen und zeitwirtschaftlichen Gesichtspunkten zu analysieren und zu bewerten.“ (VDI 4499 Blatt 4).

Die Analysen und Bewertungen unter ergonomischen, arbeitsmethodischen und zeitwirtschaftlichen Gesichtspunkten erfolgt dabei unter Verwendung eines Menschmodells, das mit einem Arbeitsplatzmodell interagiert. Die Untersuchungen können gemäß der Mechanik in geometrische, kinematische, statische und dynamische Analysen klassifiziert werden. Kollisionsuntersuchungen finden dabei in all diesen Klassen Anwendung (siehe Abbildung 2.9).

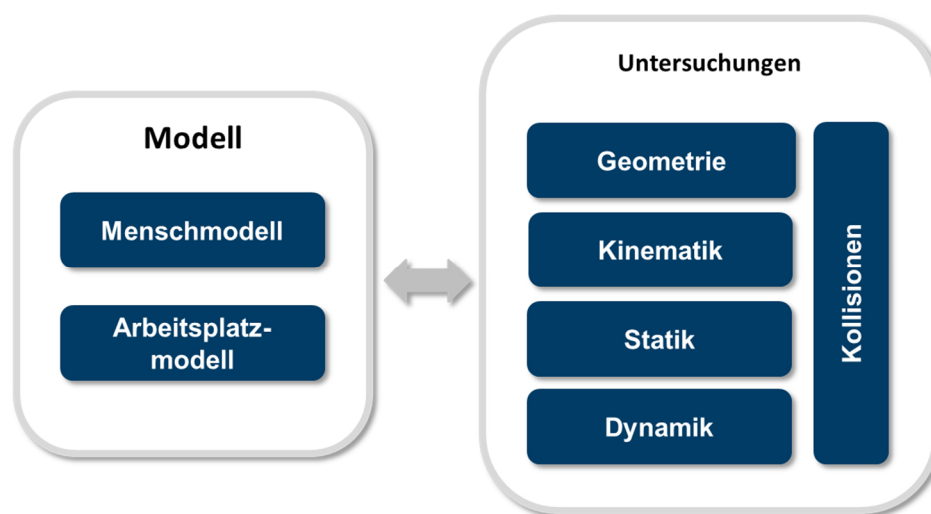


Abbildung 2.9: Aspekte ergonomischer Analysen (in Anl. an VDI 4499-4)

Bilden Menschmodell und Arbeitsplatzmodell ein experimentierbares Modell, das unter dynamischen oder kinematischen Gesichtspunkten untersucht wird, ergibt dies eine Form der Simulation, die allgemein als Ergonomiesimulation bezeichnet wird. Bracht et al. (Bracht et al., 2011) ordnen die Ergonomiesimulation den kontinuierlichen Simulationsverfahren zu und definiert sie wie folgt:

„Bei der Ergonomiesimulation ist der Mensch mit seinen physischen und psychischen Eigenschaften Gegenstand der Betrachtung und kann hinsichtlich Belastung und Beanspruchung analysiert werden. Auf Basis definierter Arbeitsabläufe und anhand von Bewegungen, körpereigenen Belastungen und bewegten Gewichten lässt sich z.B. die Beanspruchung in den einzelnen Körperteilen messen und mit Grenzwerten vergleichen.“ (Bracht et al., 2011)

In den folgenden Unterabschnitten werden zunächst allgemeine digitale Menschmodelle und deren Entwicklung beschrieben, ehe arbeitswissenschaftliche Menschmodelle beschrieben werden, die sich zur ergonomischen Abbildung in der Digitalen Fabrik bzw. für die Ergonomiesimulation eignen. Weiterhin wird aufgezeigt, inwiefern sich die Körperhaltung

arbeitswissenschaftlicher Menschmodelle manipulieren lässt und welche Möglichkeiten der Bewegungsgenerierung zur Verfügung stehen. Abschließend werden Erkenntnisse aus Studien zur Anwendung von digitalen Menschmodellen in der Digitalen Fabrik bzw. der Ergonomiesimulation aufgezeigt.

2.2.1 Digitale Menschmodelle

„Als Digitale Menschmodelle werden Softwaresysteme oder Teile von Softwaresystemen bezeichnet, die modellhaft Eigenschaften und Fähigkeiten des menschlichen Organismus oder Elemente davon abbilden und zur Nutzung bereitstellen.“ (Mühlstedt, 2012)

Das erste digitale Menschmodell hatte seinen Ursprung in der Luft- und Raumfahrt und entstand bereits in den frühen 1960er Jahren. Es wurde entwickelt, um Massenträgheiten in der Schwerelosigkeit zu simulieren (Bubb & Fritzsche, 2009). Im Laufe der Zeit entwickelten sich verschiedenste Menschmodelle, die auf unterschiedlichsten Konzepten beruhen. Dies war unter anderem die Abbildung des Menschen über eine Zusammensetzung aus polygonalen Grundkörpern, über eine Vielzahl an Kugeln oder aus horizontalen Schichten bis hin zu Mehrkörpermodellen und Finite-Elemente-Modellen (Mühlstedt, 2012).

Abbildung 2.10 zeigt zwei frühe digitale Menschmodelle aus dem Jahr 1967, die den Menschen anthropometrisch abbilden. Links ist das Menschmodell *First Man*, das bei Boeing entwickelt wurde, dargestellt. Rechts wird das Menschmodell *Sammie*, das an der Universität von Nottingham entwickelt wurde, aufgezeigt. (Bubb & Fritzsche, 2009).

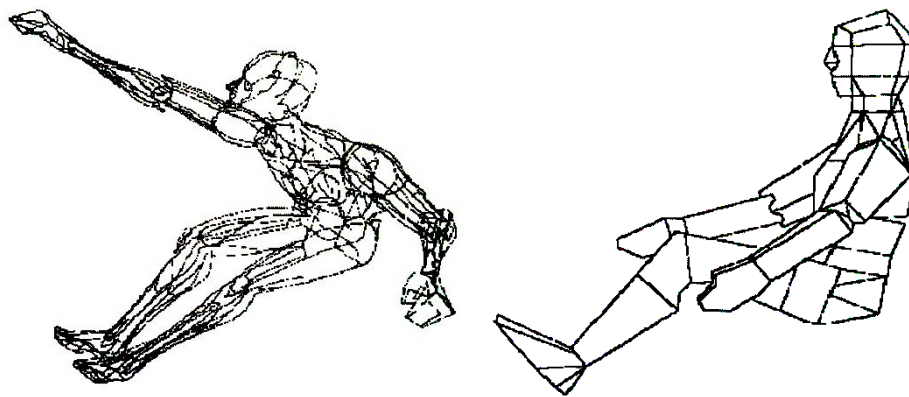


Abbildung 2.10: Digitales Menschmodell *First Man* (links) und *Sammie* (rechts) (Bubb & Fritzsche, 2009)

Die Anwendung von digitalen Menschmodellen geht heute über deren Ursprung aus der Luft- und Raumfahrt hinaus. Zum einem in den dem Ursprung naheliegenden Disziplinen, wie etwa der ergonomischen oder der wartungsgerechten Produktgestaltung, zum anderen werden digitale Menschmodelle heutzutage in gänzlich anderen Bereichen, insbesondere in der elektronischen Unterhaltungs- und Spieleindustrie, eingesetzt. Eine Vielzahl unterschiedlicher

Anwendungen, Technologien und Wissenschaften von digitalen Menschmodellen zeigt Abbildung 2.11.

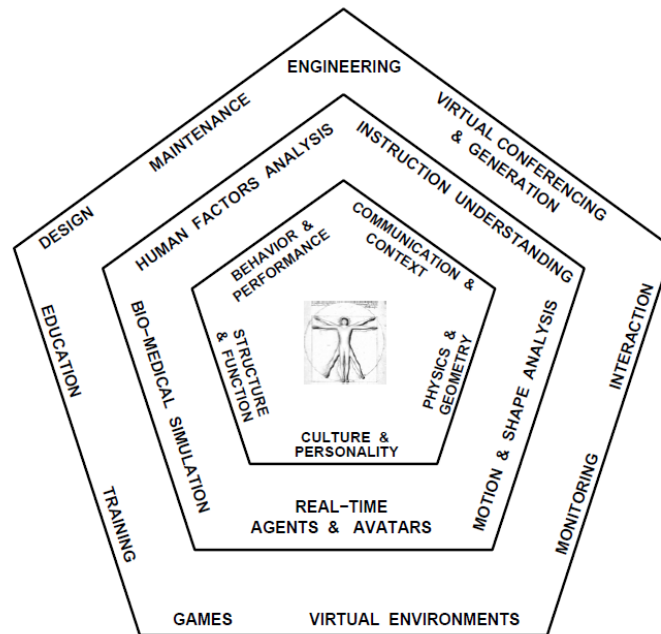


Abbildung 2.11: Anwendungen, Technologien und Wissenschaften digitaler Menschmodelle (Badler, 1997)

Die Vielzahl unterschiedlicher Anwendungen fordert auch jeweils unterschiedliche Beschreibungsdimensionen der digitalen Menschmodelle, die im Laufe der Zeit durch die Verbreitung zugenommen haben. In Abbildung 2.12 ist eine Einordnung der unterschiedlichen Eigenschaften und Fähigkeiten aufgezeigt, die digitale Menschmodelle im Allgemeinen einnehmen können. Dabei erfüllen die Modelle, je nach Anwendungsfall, eine bestimmte Teilmenge dieser Eigenschaften und Fähigkeiten. Beispielsweise erfüllen digitale Menschmodelle aus der Spieleindustrie häufig hohe Anforderungen an eine detaillierte Visualisierung, die für die Abbildung in der Digitalen Fabrik bzw. für die Ergonomiesimulation eine eher untergeordnete Rolle spielt.

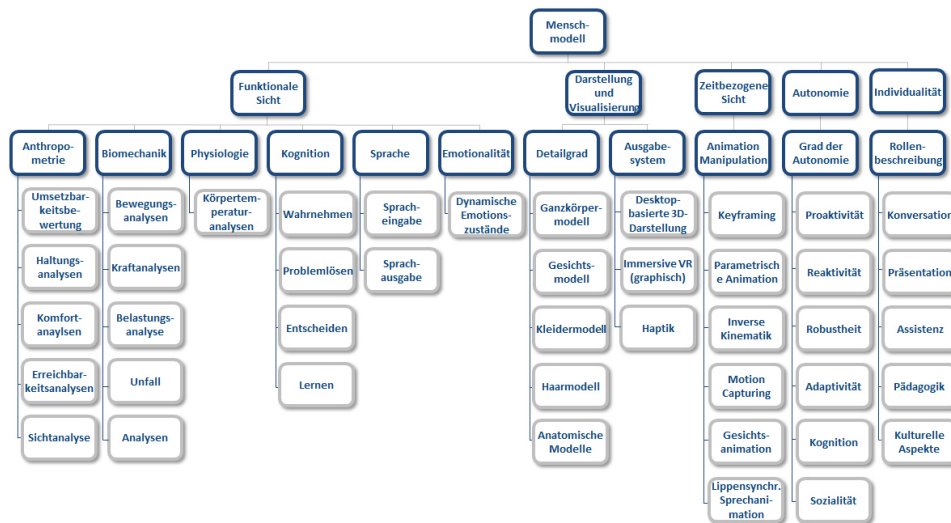


Abbildung 2.12: Beschreibungsdimensionen digitaler Menschmodelle (in Anl. an Kompetenzzentrum für virtuelle Realität und Kooperatives Engineering w.V., 2013)

Je nachdem welche Eigenschaften und Fähigkeiten die Menschmodelle einnehmen, eignen sie sich mehr oder weniger für den Einsatz in der Digitalen Fabrik. Mühlstedt & Spanner-Ullmer (Mühlstedt & Spanner-Ullmer, 2009) kategorisieren die digitalen Menschmodelle, gemäß Abbildung 2.13, in drei Kategorien. Dies sind digitale Menschmodelle, die eigens zentral für arbeitswissenschaftliche Untersuchungen bzw. den Einsatz in der Digitalen Fabrik entwickelt wurden, digitale Menschmodelle, die zwar nicht speziell für die Digitale Fabrik entwickelt wurden, allerdings hierfür nutzbar sind und darüber hinaus Menschmodelle, die für arbeitswissenschaftliche Analysen unbrauchbar sind.

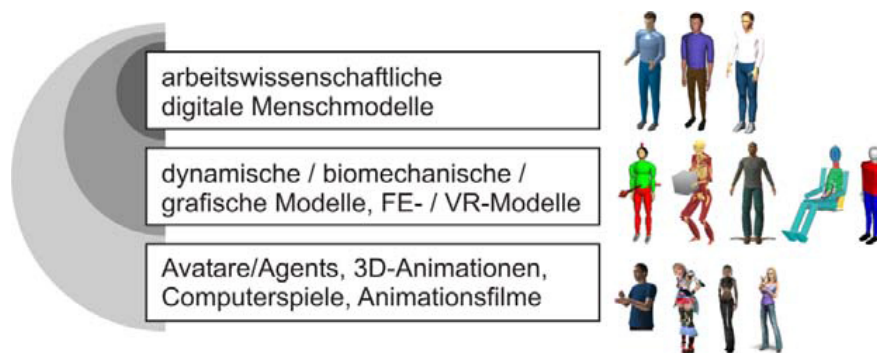


Abbildung 2.13: Einteilung der Menschmodelle nach der arbeitswissenschaftlichen Nutzbarkeit (Mühlstedt & Spanner-Ulmer, 2009)

2.2.2 Aufbau arbeitswissenschaftlicher Menschmodelle

„Als arbeitswissenschaftlich bezeichnete digitale Menschmodelle ... helfen ... als Bestandteil der Digitalen Fabrik dem Planer bei der arbeitswissenschaftlichen Prozessplanung.“ (Mühlstedt, 2012)

Den gebräuchlichen Aufbau digitaler, arbeitswissenschaftlicher Menschmodelle zeigt Abbildung 2.14 (links). Die Modelle sind aus einem sichtbaren äußeren Modell und einem nicht sichtbarem inneren Modell aufgebaut. Das innere Modell stellt eine Art Skelett dar, das aus mehreren starren Gliedern besteht, die über Gelenke miteinander verknüpft sind. Es stellt die kinematische Kette des Menschmodells dar. Das äußere Modell repräsentiert über eine oder mehrere Flächen das Erscheinungsbild des Modells und wird auch häufig als Haut oder Hülle bezeichnet. Die Haut kann hierbei segmentiert ausgeführt sein oder der Übergang von einem Körperteil zum nächsten kann weich ausgeführt werden. Abbildung 2.14 (Mitte) zeigt anhand des Menschmodells *Jack* von *Siemens* die Unterschiede zwischen beiden Varianten, wobei dort links die segmentierte Ausführung zu sehen ist. Auf der rechten Seite ist das innere und äußere (segmentierte) Modell des Menschmodells *HumanBuilder* von Dassault Systems dargestellt. Der innere und äußere Aufbau arbeitswissenschaftlicher Menschmodelle erfolgt unter Berücksichtigung anthropometrischer³ Daten. Der Anwender kann u.a. die Datenbasis bzw. die Population und das Perzentil des darzustellenden Menschmodells einstellen.

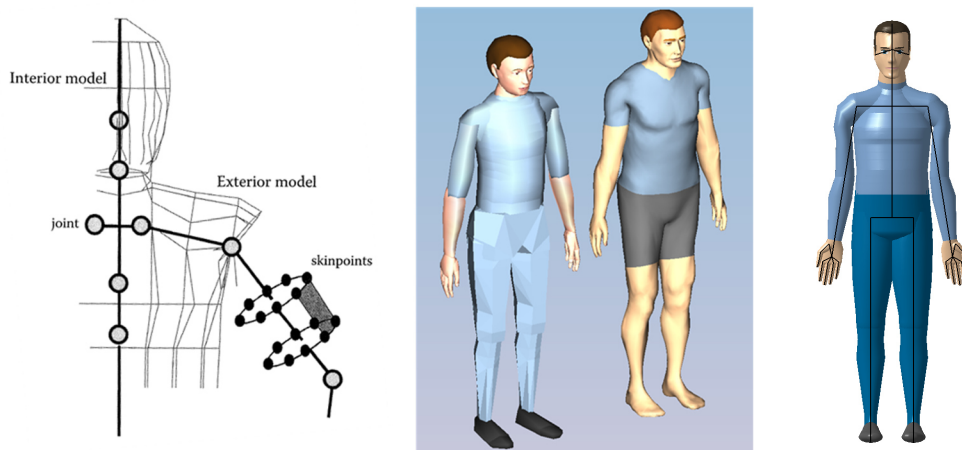


Abbildung 2.14: links: Aufbau eines digitalen Menschmodells (Bubb & Fritzsche, 2009), mitte: *Jack* in segmentierter und weicher Ausführung, rechts: Innere und äußere Version von *HumanBuilder*

Bei der segmentierten Ausführung ist jedes Glied starr mit einer dazugehörigen Fläche verbunden, die meist geschlossen ist. Jedem Glied ist ein Flächensegment zugeordnet. Die relative Lage jedes Punktes des Flächensegmentes zu dessen Knochen ist dabei konstant (Abbildung 2.15 links). Bei weichem Übergang zwischen den einzelnen Körperteilen ist die Lage der Punkte auf der Hülle abhängig von den Winkelstellungen der Gelenke (Abbildung 2.15 rechts).

³ Als Anthropometrie bezeichnet „man die Lehre von funktionellen und geometrischen Abmessungen des menschlichen Körpers“ (Schnauber, 1979)

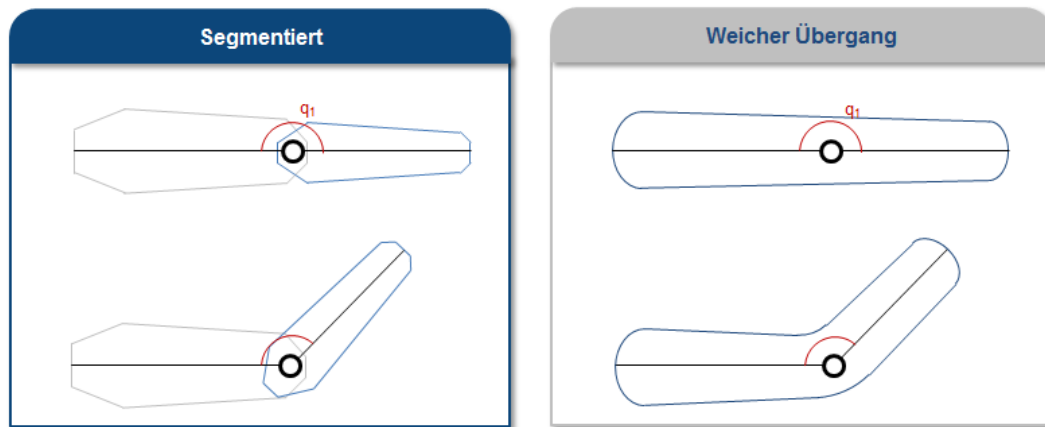


Abbildung 2.15: Vereinfachte Schnittdarstellung durch ein Gelenk mit segmentiertem und weichem Übergang

Maßgeblich für die Beschreibung der Körperhaltung eines Menschmodells, die auch als Pose bezeichnet wird, ist dessen Zustand der kinematischen Kette, der über die Winkelstellungen bzw. dessen Gelenkkonfiguration \vec{q} definiert ist:

$$\vec{q} = (q_1 \quad q_2 \quad \dots \quad q_n)^T$$

Dabei sind q_i die einzelnen Gelenkwinkel der Kette und n die Anzahl an Freiheitsgraden.

Es können zudem mehrere Gelenkwinkel zu einer Gelenkgruppe zusammengefasst werden, indem die Größe der einzelnen Gelenke dieser Gruppe in Abhängigkeit einer gemeinsamen Stellgröße bestimmt werden. Abbildung 2.16 zeigt dies exemplarisch an der Beugung der Wirbelsäule (Flexion) des Menschmodells Jack. Dargestellt ist das innere und äußere Modell des Menschmodells in maximal nach hinten gebeugter, aufrechter und maximal nach vorne gebeugter Haltung. Gesteuert wird die Stellung der Wirbelsäule über das Stellglied s , das Werte zwischen 39 und 68 einnehmen kann.

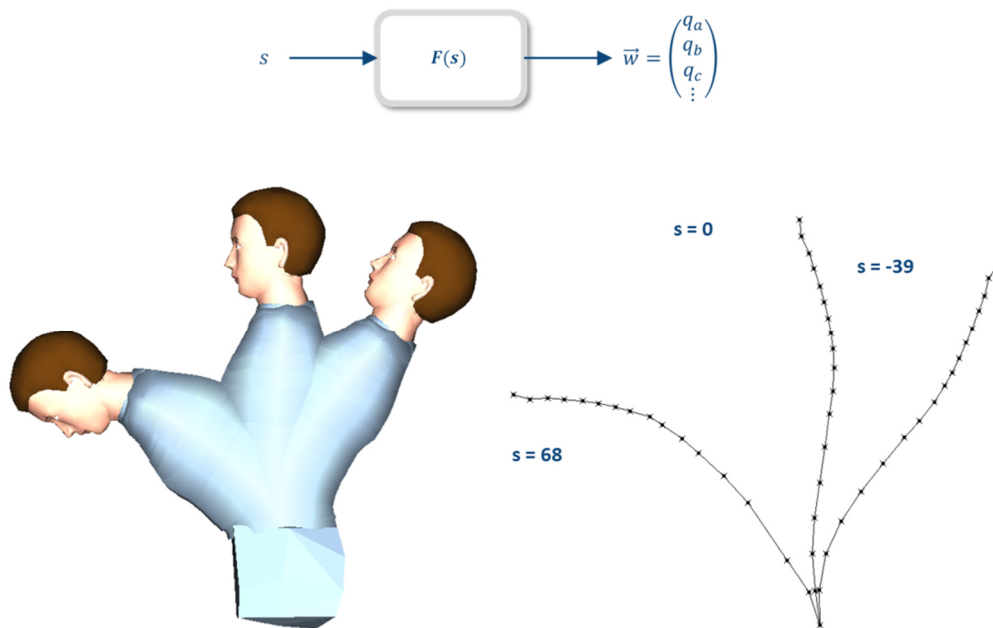


Abbildung 2.16: Zusammenfassung der Wirbelsäule als Gelenkgruppe am Beispiel von *Jack*

2.2.3 Manipulationsfunktionen der Körperhaltung arbeitswissenschaftlicher Menschmodelle

Die Manipulation der Körperhaltung stellt die wichtigste und zugleich auch die am häufigsten verwendete Manipulationsfunktion von Menschmodellen der Digitalen Fabrik dar. Grundsätzlich wird sie für statische Untersuchungen (z.B. für Erreichbarkeitsanalysen), aber auch teilweise für die Generierung von Bewegungen des Menschmodells benötigt.

Zur Manipulation der Pose des Menschmodells stehen grundsätzlich mehrere Funktionen und Methoden zur Verfügung, die im Folgenden beschrieben werden.

Vorwärtskinematik

Eine Möglichkeit die Körperhaltung des Menschmodells zu verändern, ist die direkte Eingabe der Winkelkonfiguration über eine Benutzungsschnittstelle. Aus dieser Winkelkonfiguration werden dann die Positionen und Orientierungen der einzelnen Körperteile über Methoden der Vorwärtskinematik errechnet. Die einzelnen Oberflächen der Körperteile sind in ihren jeweiligen Basis-Koordinatensystemen beschrieben. Es muss nun jeder Punkt der Oberfläche in das übergeordnete, globale Koordinatensystem des Menschmodells transformiert werden. Wesentlich dabei ist die Bestimmung der Position und Orientierung des Basis-Koordinatensystems des jeweiligen Körperteils zum globalen Koordinatensystem. Eine weit verbreitete und systematische Möglichkeit dieses Problem zu lösen, ist die Denavit-Hartenberg-Notation, die u.a. von Rieseler (Rieseler, 1992) Paul (Paul, 1982) und Abdel-

Malek & Jasbir (Abdel-Malek & Jasbir, 2009) beschrieben wurden und im Folgenden aufgezeigt wird.

Betrachtet wird ein Teil einer kinematischen Kette mit den Gliedern i und $i-1$ (siehe Abbildung 2.17). Diese sind von den Gelenken eingeschlossen, die entlang der Achsen $i-1$, i und $i+1$ rotieren. Gesucht ist nun eine Möglichkeit, Koordinaten vom Basis-Koordinatensystem des Gliedes i in das Koordinatensystem des Gliedes $i-1$ in Abhängigkeit der Winkelstellung des Gelenkes i zu transformieren. Hierzu werden zunächst die Parameter der offenen kinematischen Kette sowie die Lage der Koordinatensysteme betrachtet. Dabei ist a_i die Distanz der gemeinsamen Normalen der Achsen i und $i+1$. Der Winkel α_i stellt den Verdrehwinkel zwischen den Achsen i und $i+1$ dar und d_i ist der Abstand der Schnittpunkte der Normalen a_{i-1} und a_i entlang der Achse i . Der Winkel q_i zwischen den Gliedern i und $i-1$ ist der Verdrehwinkel von a_i und a_{i-1} in einer zur Achse i senkrechten Ebene.⁴

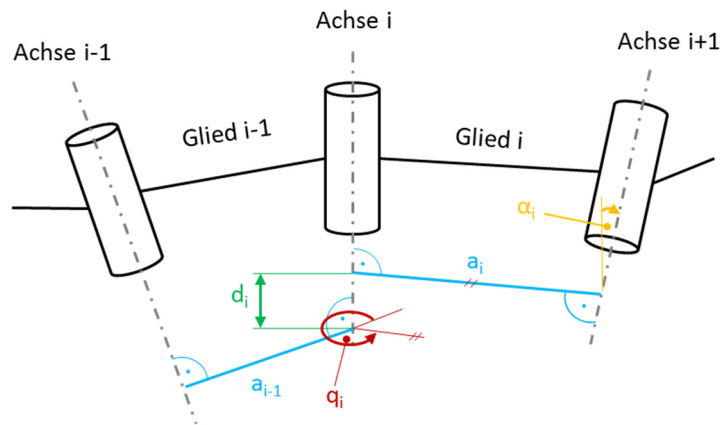


Abbildung 2.17: Vorwärtskinematik über die Denavit-Hartenberg-Notation (in Anl. an Paul, 1982; zit. nach Rieseler, 1992)

Der Ursprung des Basis-Koordinatensystems liegt dann im Schnittpunkt der Normalen a_i mit der Achse $i+1$ (Abbildung 2.18). Schneiden sich die Achsen i und $i+1$, liegt der Ursprung im Schnittpunkt, sind sie parallel, wird der Ursprung so gewählt, dass d_{i+1} null ergibt. Die z -Richtung des Koordinatensystems z_i zeigt in Richtung der Achse $i+1$, die positive Richtung wird entlang der positiven Bewegungsrichtung des Gelenkes entsprechend festgelegt. Die Achse x_i wird entlang der Normalen a_i in Richtung aufsteigender Gliedindizes gelegt. Schneiden sich die Achsen i und $i+1$, so zeigt x_i in Richtung des Kreuzproduktes der beiden Richtungsvektoren von i und $i+1$. Die Achse y_i ergibt sich aus x_i und z_i , sodass diese zusammen ein Rechtssystem bilden.

⁴ Dies gilt nur für den Fall, dass sich die Achsen i und $i-1$ sich nicht schneiden. Für das Vorgehen, wenn sich die Achsen schneiden, siehe Rieseler (1992)

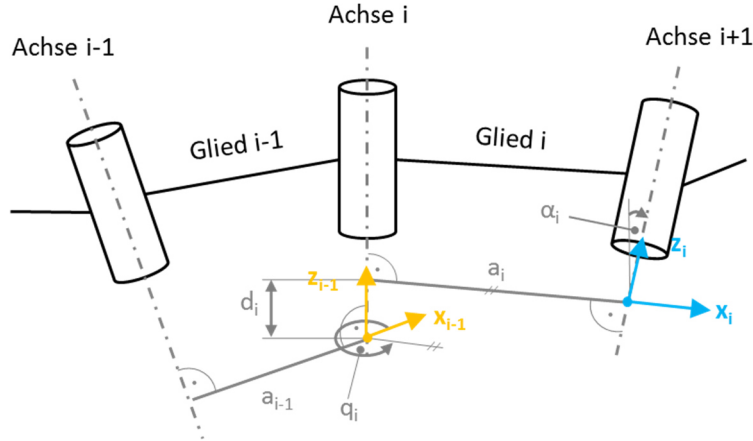


Abbildung 2.18: Vorwärtskinematik über die Denavit-Hartenberg-Notation (in Anl. an Paul, 1982; zit. nach Rieseler, 1992)

Die Transformationsmatrix, mit der sich die Punkte aus dem Koordinatensystem des Gliedes i im Koordinatensystem $i-1$ beschreiben lassen, kann durch eine Verkettung von Rotationen und Translationen beschrieben werden, die das Koordinatensystem des Gliedes i in das des Gliedes $i-1$ überführen. Diese sind im Einzelnen:

1. Rotiere um z_{i-1} um den Winkel q_i
2. Verschiebe den Ursprung entlang der Achse z_{i-1} um d_i
3. Verschiebe entlang der rotierten Achse x_{i-1} um a_i
4. Rotiere um x_i um α_i

Jede dieser Operationen lässt sich durch eine Transformationsmatrix beschreiben. Die Matrizenmultiplikation dieser Matrizen ergibt dann wie folgt die gesuchte Transformationsmatrix:

$$\begin{aligned}
 {}^{i-1}T_i &= \begin{pmatrix} \cos q_i & -\sin q_i & 0 & 0 \\ \sin q_i & \cos q_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} \cos q_i & -\cos \alpha_i \sin q_i & \sin \alpha_i \sin q_i & a_i \cos q_i \\ \sin q_i & \cos \alpha_i \cos q_i & -\sin \alpha_i \cos q_i & a_i \sin q_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Die Transformationsmatrix der Überführung von Koordinaten aus dem Koordinatensystem des beliebigen Gliedes n in das globale Koordinatensystem des Menschmodells des Gliedes 0 ergibt sich dann wie folgt:

$${}^0T_n = {}^0T_1 {}^1T_2 \dots {}^{n-1}T_n$$

Mithilfe dieser Methode lässt sich die Manipulation des Menschmodells über die Vorwärtskinematik technisch relativ einfach und problemlos umsetzen (Arlt, 1999). Bei dieser Methode ist der Anwender nun aufgefordert, eine Gelenkkonfiguration zu finden, damit das Menschmodell eine gewünschte Pose einnimmt. Diese Zielpose muss dabei nicht zwingend realistisch sein (Arlt, 1999). Das Finden und Einstellen geeigneter Gelenkwinkel gestaltet sich dabei als schwierig und sehr zeitaufwändig.

Inverse Kinematik

Eine weitere Möglichkeit die Körperhaltung des Menschmodells zu manipulieren, ist über Methoden der inversen Kinematik. Hierbei wird von der Lage und Orientierung der Endeffektoren der kinematischen Kette bzw. deren Koordinatensysteme auf die Gelenkkonfiguration geschlossen. Um die Pose des Menschmodells zu ändern, verändert der Anwender die räumliche Anordnung der Endeffektoren und das Menschmodell nimmt daraufhin eine entsprechende Haltung ein.

Das Problem der inversen Kinematik wird häufig numerisch, iterativ über die inverse Jacobi-Matrix der kinematischen Kette gelöst und wird von Rieseler (Rieseler, 1992), Hering-Bertram (Hering-Bertram) und Weber (Weber, 2013) beschrieben und hier aufgegriffen.

Die Lage und Orientierung des Endeffektors, bezogen auf ein globales Koordinatensystem, des Menschmodells lässt sich über den Vektor \vec{x} beschreiben.

$$\vec{x} = (p_x \ p_y \ p_z \ \theta_x \ \theta_y \ \theta_z)^T$$

Hierbei stellen die Komponenten p_x, p_y und p_z die Position zum Ursprung des globalen Koordinatenursprungs dar und die Winkel θ_x, θ_y und θ_z die Orientierung zu diesem. Die Lage und Orientierung kann als Funktion der Gelenkkonfiguration ausgedrückt werden.

$$\vec{x} = F(\vec{q})$$

Damit gilt:

$$d\vec{x} = \frac{\partial F}{\partial \vec{q}} d\vec{q}$$

Für kleine Änderungen von \vec{q} ist folgende Linearisierung annähernd korrekt:

$$\Delta \vec{x} = \frac{\partial F}{\partial \vec{q}} \Delta \vec{q} = J(\vec{q}) \Delta \vec{q}$$

$$\begin{pmatrix} \Delta p_x \\ \Delta p_y \\ \vdots \\ \Delta \theta_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial p_x}{\partial q_1} & \frac{\partial p_x}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial p_x}{\partial q_n} \\ \frac{\partial p_y}{\partial q_1} & \frac{\partial p_y}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial p_y}{\partial q_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \theta_z}{\partial q_1} & \frac{\partial \theta_z}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial \theta_z}{\partial q_n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta p_1 \\ \Delta p_2 \\ \vdots \\ \Delta p_n \end{pmatrix}$$

Dabei ist $J(\vec{q})$ die Jacobi-Matrix. Die Differenz der Winkel $\Delta \vec{q}$ lässt sich aus einer Differenz von $\Delta \vec{x}$ über die Inverse der Jacobi-Matrix berechnen:

$$\Delta \vec{q} = J^{-1}(\vec{q}) \Delta \vec{x}$$

Das Problem der Inversen Kinematik lässt sich nun wie folgt formulieren. Es soll die Winkelkonfiguration \vec{q}_1 des Menschmodells mit der Anfangswinkelkonfiguration \vec{q}_0 gefunden werden, sodass die Lage und Orientierung des Endeffektors den Vektor \vec{x}_1 ergeben. Algorithmus 1 beschreibt anhand von Pseudocode die Funktion CLIK, die dieses Problem näherungsweise löst. Neben \vec{x}_1 und \vec{q}_0 werden als Eingabe noch der Stabilitätsfaktor α sowie die Funktion $k()$ zur Berechnung von Lage und Orientierung des Endeffektors über Vorwärtskinematik benötigt. Die Winkelkonfiguration \vec{q} wird ausgehend von \vec{q}_0 solange angenähert, bis die aus \vec{q} resultierende Lage und Orientierung des Endeffektors hinreichend genau mit dem Zielvektor \vec{x}_1 übereinstimmt. Dies ist dann der Fall, wenn der Betrag der Abweichung $\Delta \vec{x}$ dieser beiden Vektoren kleiner ist als eine vorgegebene maximale Abweichung ε . Hierbei lässt sich über den Stabilitätsfaktor α die Geschwindigkeit der Konvergenz und die Stabilität beeinflussen.

Algorithmus 1: Inverse-Kinematik-Algorithmus (in Anl. an Borst et al., 2012)

- 1: $\vec{q}_1 = \text{CLIK}(\vec{x}_1, \vec{q}_0, \alpha, k()) :$
- 2: $\Delta \vec{x} = \vec{x}_1 - k(\vec{q}_0)$
- 3: $\vec{q} = \vec{q}_0$
- 3: *while* $|\Delta \vec{x}| > \varepsilon$ *do*
- 4: $J(\vec{q}) = \text{computeJacobian}(k(), \vec{q})$
- $\Delta \vec{x} = \vec{x}_1 - k(\vec{q})$
- 5: $\vec{q} = \vec{q} + \alpha J^{-1}(\vec{q}) \Delta \vec{x}$
- 7: *end while*
- 8: *return* \vec{q}

Voraussetzung für die Lösung des Problems ist die Invertierbarkeit von J . Dies ist zum einen nur möglich, wenn J nicht singulär ist⁵, d.h. die Determinante von J nicht null ist und zum anderen, wenn J quadratisch ist. Das bedeutet, die kinematische Kette muss sechs Freiheitsgrade besitzen. In der Regel besitzen die Menschmodelle jedoch deutlich mehr als diese sechs Freiheitsgrade, was zu einem unterbestimmten System führt. Dies macht es notwendig, über Randbedingungen weitere Einschränkungen zu formulieren. Solche Randbedingungen sind etwa die minimale Quadratsumme der Winkelinkremente oder die minimale potenzielle Energie (Menges, 1992). Als bisheriges Problem stellt sich jedoch heraus, korrekte Randbedingungen zu finden, die eine natürliche Körperhaltung bei allen räumlichen Anordnungen der Endeffektoren gewährleisten. Aufgrund fehlender Kenntnisse werden hierzu bisher vereinfachte Annahmen getroffen (VDI 4499 Blatt 4). Diese Vereinfachungen können zu unnatürlichen Körperhaltungen in Abhängigkeit der räumlichen Anordnung des Endeffektors führen (siehe Abbildung 2.19). Arlt führt bei der Suche nach korrekten Randbedingungen folgendes grundsätzliches Problem an:

„Während es noch möglich erscheint, rein physikalische Effekte, wie Körperteilgewichte und die daraus resultierende Trägheit, das Körpergewicht an sich, Weg-, Kraft- oder Energieminimierung als Randbedingung zu berücksichtigen, sind individuell spezifische Einflussgrößen auf eine Bewegung wie z.B. menschliche Angewohnheiten, die Konstitution ... oder auch kulturelle Differenzen kaum in einer Formel zu beschreiben.“ (Arlt, 1999)

Auch der Anwender kann Einschränkungen der Freiheitsgrade vornehmen, indem er gezielt Körperteile fixiert, die bei Veränderung der räumlichen Anordnung des Endeffektors nicht verändert werden sollen.

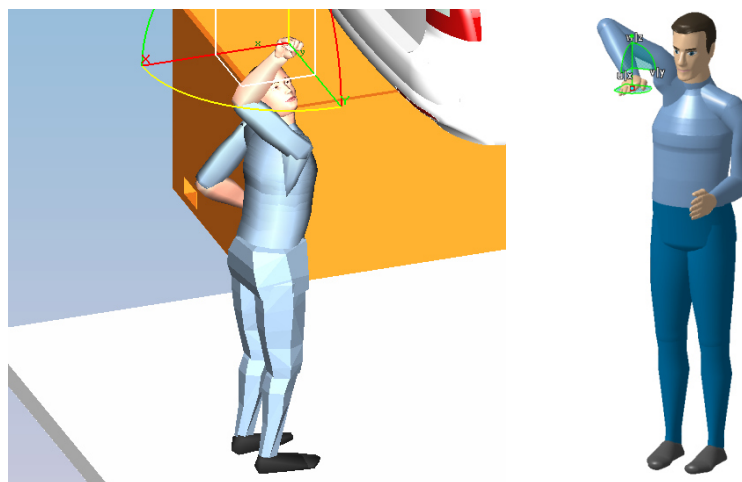


Abbildung 2.19: Unnatürliche Körperhaltungen, die über inverse Kinematik erzeugt wurden, am Beispiel von Jack und HumanBuilder

⁵Als Abhilfe kann dann u.a. die pseudoinverse Jacobimatrix $J^+ = J^T(JJ^T)^{-1}$ verwendet werden

Die Verwendung der inversen Kinematik durch den Benutzer kann unter anderem wie in Abbildung 2.19 dargestellt erfolgen, indem am zu manipulierenden Endeffektor ein Achsenkreuz eingeblendet wird, das mit der Maus in und um alle drei Raumachsen verschoben bzw. gedreht werden kann. Die Verwendung kann aber auch parametrisch in Dialogform erfolgen. Der Benutzer gibt zum Beispiel vor, dass das Menschmodell zu einem Objekt hinlängen soll. Anschließend werden weitere Informationen wie etwa, ob einhändig bzw. beidhändig oder zu welchem Objekt hingelangt werden soll, angegeben. Die räumliche Anordnung der Hände wird dann aus der Simulationsumgebung, durch Lage und Orientierung des Objekts, das erreicht werden soll, ermittelt und über die inverse Kinematik wird letzten Endes die Körperhaltung ermittelt.

Haltungsbibliotheken

Eine weitere Möglichkeit die Körperhaltung des Menschmodells zu ändern, besteht in der Verwendung von Haltungsbibliotheken. Dabei werden Gelenkkonfigurationen häufig eingenommener Haltungen wie Sitzen, Knien, etc. in einer Bibliothek abgespeichert. Diese können dann durch den Benutzer aufgerufen werden, sodass das Menschmodell die entsprechende Pose einnimmt. In der Bibliothek kann neben einem Satz vorgegebener Haltungen, die in der Software enthalten sind, auch die Möglichkeit gegeben werden, selbst definierte Körperhaltungen mit aufzunehmen. Abbildung 2.20 zeigt beispielhaft die Haltungsbibliothek vom Menschmodell *Jack* und das Menschmodell, nachdem die Pose *Seated erect* aufgerufen wurde. In dieser Schnittstelle kann zudem noch ausgewählt werden, welche Körperteile des Menschmodells die Winkel der ausgewählten Pose übernehmen sollen.

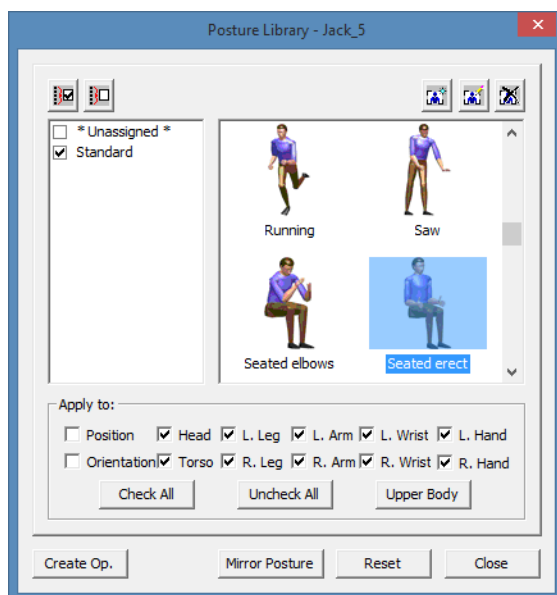


Abbildung 2.20: Haltungsbibliothek des Menschmodells *Jack*

2.2.4 Bewegungsgenerierung arbeitswissenschaftlicher Menschmodelle

Prinzipiell gibt es drei wesentliche Methoden zur Bewegungsgenerierung von arbeitswissenschaftlichen Menschmodellen, die bereits in Wiegmann & Brüggemann (Wiegmann & Brüggemann, 2015) aufgeführt worden sind und an dieser Stelle ausführlicher beschrieben werden sollen.

Keyframing

Diese häufig angewandte Technik stammt ursprünglich aus der Filmindustrie. Mithilfe der Manipulationsfunktion werden charakteristische Posen, so genannte Keyframes, des Menschmodells erzeugt. Eine diskretisierte Bewegung wird dann erzeugt, indem zwischen diesen Posen interpolierte Posen bzw. Frames erzeugt werden (siehe Abbildung 2.21). Interpoliert wird zumeist linear (Schönherr, 2014). Die Winkelkonfiguration über die Zeit t zwischen der Anfangswinkelkonfiguration \vec{q}_a zum Zeitpunkt t_0 und der Endwinkelkonfiguration \vec{q}_e zum Zeitpunkt t_1 ergibt sich dann wie folgt:

$$\vec{q}(t) = \frac{(\vec{q}_e - \vec{q}_a)}{t_1 - t_0} \cdot t$$

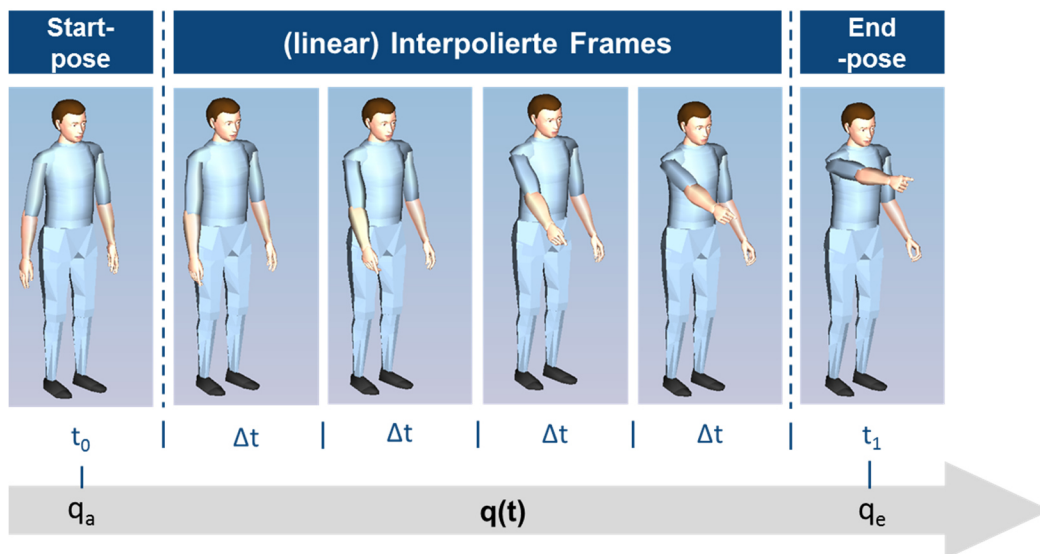


Abbildung 2.21: Bewegungsgenerierung durch Keyframing (Wiegmann & Brüggemann, 2015)

Bei dieser Art der Generierung wird nur dann eine realistische Bewegung erzeugt, wenn sich Start- und Endpose nicht zu stark unterscheiden (Schönherr, 2014). Für die Generierung natürlicher Bewegungen werden dementsprechend viele Keyframes benötigt.

Motion Capturing

Eine weitere Art der Bewegungsgenerierung ist das Motion Capturing, was ebenfalls in der Filmindustrie anzufinden ist. Bei diesem Verfahren werden die geplanten Abläufe von Probanden durchgeführt. Hierbei werden bestimmte Schlüsselpunkte am menschlichen Körper

bei der Bewegung aufgezeichnet und auf das digitale Menschmodell übertragen, was auch als Mapping bezeichnet wird (Menache, 2010). Häufig müssen hierzu die Probanden spezielle Anzüge tragen, an denen Marker bzw. Sensoren angebracht sind. Abbildung 2.22 verdeutlicht das Motion-Capturing-Verfahren an einem Beispiel, bei dem das Hinlangen in das Innere eines Fahrzeuges simuliert wird.



Abbildung 2.22: Beispiel Motion Capturing (Siemens Software Industries)

Die Systeme zur Erfassung der Bewegungen lassen sich grundlegend in optische, elektromagnetische, elektromechanische und trägheitsbasierte Systeme unterteilen. Je nachdem welches System eingesetzt wird, können unterschiedliche Umgebungseinflüsse die Durchführung der Bewegungsdatenerfassung stören. Bei optischen Systemen stellt das größte Problem dar, dass Körperteile bzw. Schlüsselpunkte, die verdeckt sind, nicht erfasst werden können. Bei elektromagnetischen Systemen können metallische Komponenten das Magnetfeld verzerren. Bei elektromechanischen Systemen kann der Anzug, meist ein Exo-Skelett, die Probanden in ihrer Bewegung einschränken und beeinflussen. Trägheitsbasierende Systeme messen nicht die Position der Schlüssel-Punkte am Körper der Probanden, sondern deren Beschleunigung. Bei der Berechnung der Position kann hierbei der zeitlich anwachsende Fehler (Drift) zu Problemen führen. (Menache, 2010)

Das Motion-Capturing führt prinzipiell zu realistischen Bewegungen. Die Bewegungen sind allerdings völlig unabhängig von Einflussparametern. Zudem lassen sich Änderungen, z.B. Veränderungen einer Schrauberposition, zunächst nicht direkt in der Simulationsumgebung durchführen (Arlt, 1999). Des Weiteren ist der finanzielle Aufwand, mit je nach System von bis zu \$250.000 für die Hard- und Software, nicht unerheblich (Menache, 2010). Auch die Durchführung der Bewegungsaufnahme an sich ist mit hohem Aufwand verbunden, da häufig Prototypen von Produkt und/oder Betriebsmittel vorliegen müssen.

Parametrische Bewegungsgenerierung

Die letzte Art der Bewegungsgenerierung, die hier beschrieben werden soll, ist die parametrische Bewegungsgenerierung. Die Funktionsweise dieser Methode wird in Abbildung 2.23 schematisch dargestellt und von Schönherr (Schönherr, 2014) sowie von Gläser et al. (Gläser et al, 2014) detaillierter ausgeführt. Diese Art der Bewegungsgenerierung basiert auf der Annahme, dass es ideale, von Parametern abhängige Bewegungsmuster gibt, die sich in Laborstudien aus Motion-Capture-Daten ableiten lassen. Um nun in der Ergonomiesimulation eine Bewegung des Menschmodells zu erzeugen, müssen dort die Parameter bestimmt werden. Ein Teil der Parameter wird durch den Benutzer gesetzt. Dies kann zum Beispiel die Art der Verrichtung sein, die das digitale Menschmodell ausführen soll. Ein anderer Teil der Parameter kann direkt automatisch aus der Simulationsumgebung ermittelt werden, z.B. Informationen über die räumliche Anordnung von Betriebsmittel und Produkt.

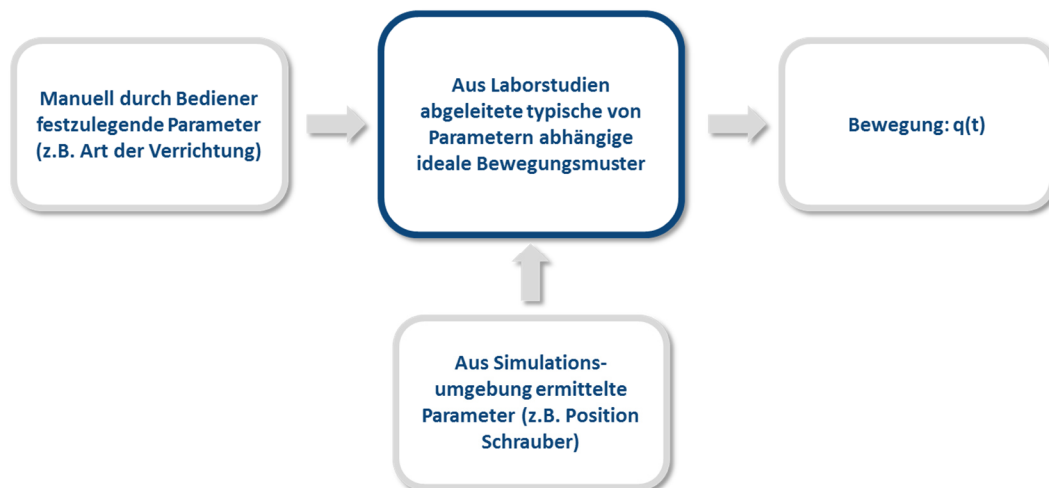


Abbildung 2.23: Schematische Darstellung der parametrischen Bewegungsgenerierung

Die bisherigen Grenzen dieser Art der Bewegungsgenerierung zeigen Gläser et al. (Gläser et al., 2014) auf. Während es bei einfachen Bewegungen noch möglich ist, parameterabhängige Bewegungsmuster abzuleiten, steigen Aufwand und Anzahl der Parameter mit zunehmender Komplexität der Verrichtungen und die Unsicherheit der Validität. Komplexere Bewegungen, die insbesondere bei der Vermeidung von Kollisionen auftreten, lassen sich bisher nicht parametrisch beschreiben.

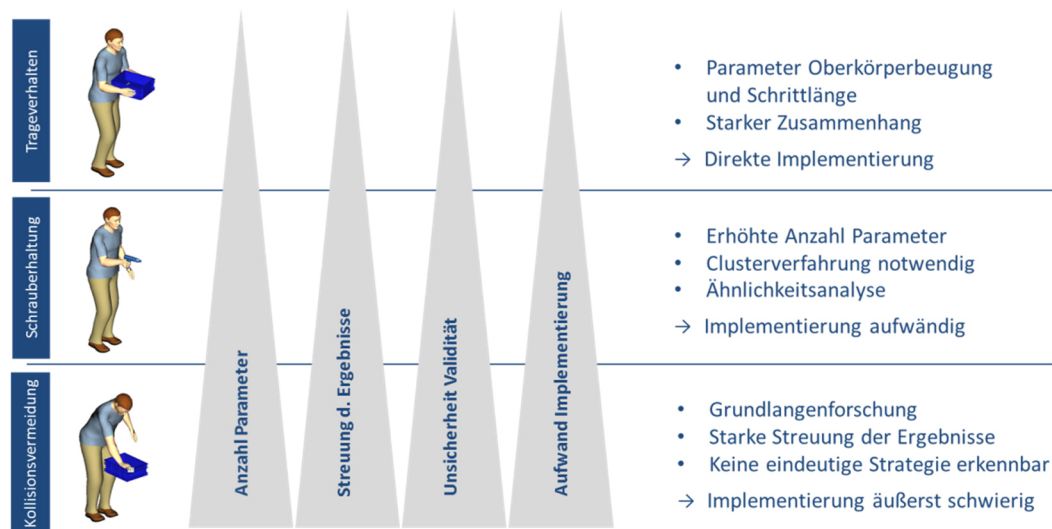


Abbildung 2.24: Stand der parametrischen Bewegungsgenerierung (in Anl. an Gläser, 2014)

2.2.5 Studien zur Anwendung arbeitswissenschaftlicher, digitaler Menschmodelle

Studien zur Anwendung von arbeitswissenschaftlichen, digitalen Menschmodellen finden sich in Mühlstedt (Mühlstedt, 2012) und in Rodríguez (Rodríguez, 2010) wieder. Rodríguez befragte 53 potenzielle Anwender zur Anwendung von digitalen Menschmodellen zur Absicherung von Montagevorgängen, von 42 erhielt er Rückmeldungen. 28 Befragte verfügten über Erfahrung in der Anwendung von digitalen Menschmodellen. Mühlstedt berichtet über die Auswertung von 59 Fragebögen einer Anwenderbefragung, bei der 124 Personen angefragt wurden.

Eine Übersicht über die Angaben bisheriger Methoden zur Absicherung manueller Montagevorgänge und der Häufigkeit der Verwendung zeigt Abbildung 2.25. Es ist zu erkennen, dass ein Großteil der Befragten hierbei nicht auf digitale Menschmodelle zurückgreift. Dies deckt sich auch mit der Aussage der VDI-Richtlinie 4499 Blatt 4, dass die Bewertung von Arbeitsplätzen mithilfe von Menschmodellen immer wieder vorgestellt wurde, aber bisher in der industriellen Anwendung weniger Bedeutung erlangt hat als bei der Entwicklung von Fahr- und Flugzeugen.

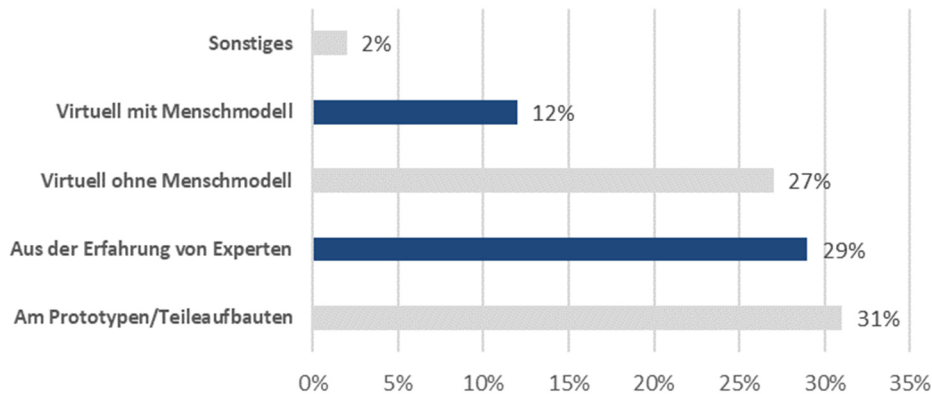


Abbildung 2.25: Methoden zur Absicherung manueller Montagevorgänge (Mehrfachnennung möglich) (in Anl. an Rodríguez, 2010)

Von den erfahrenen Benutzern gaben zudem 64% an, dass sie weniger als fünf Mal im Jahr Montageuntersuchungen mit digitalen Menschmodellen durchführen (Abbildung 2.26).

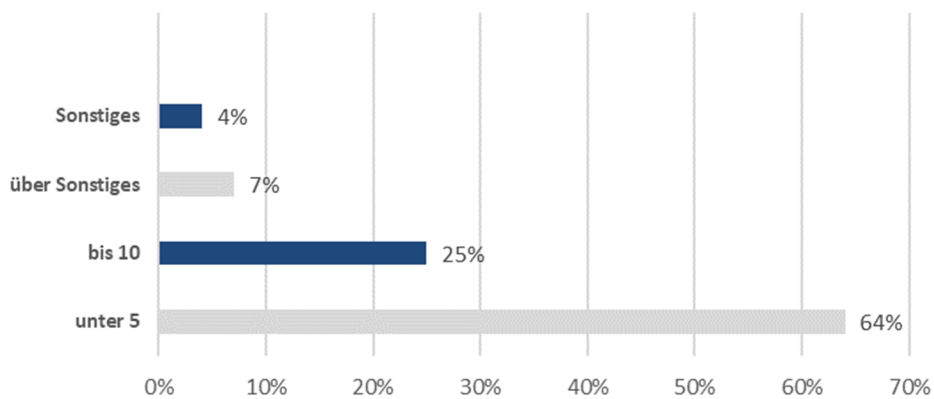


Abbildung 2.26: Anzahl der Montageuntersuchung im Jahr (in Anl. an Rodríguez, 2010)

In beiden Studien wurden ebenfalls die Vorteile digitaler Menschmodelle nach Meinung der Befragten erhoben, was in Abbildung 2.27 aufgezeigt ist.

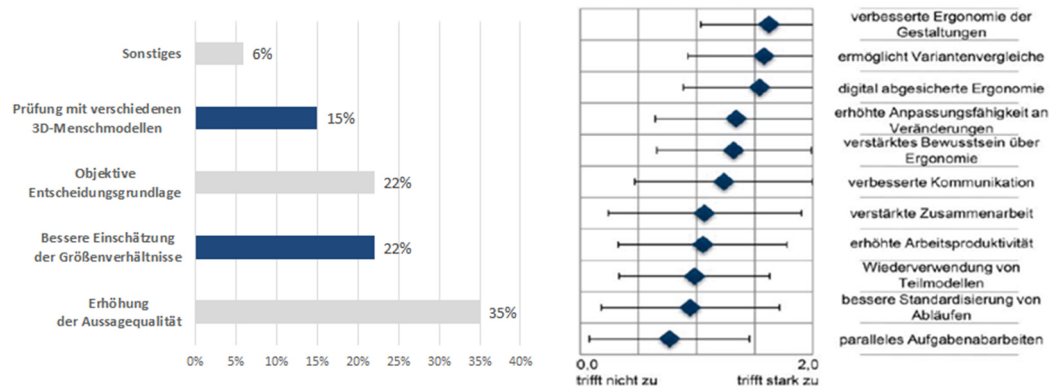


Abbildung 2.27: Vorteile digitaler Menschmodelle (links: in Anl. an Rodríguez (2010), rechts: in Anl. an Mühlstedt (2012))

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass nach Meinung der Befragten digitale Menschmodelle die Ergonomie und die Planung manueller Arbeitsprozesse verbessern. Es stellt sich nun die Frage, warum digitale Menschmodelle, trotz dieser Vorteile, relativ selten angewendet werden. Hinweise erhält man, wenn man sich die genannten Nachteile digitaler Menschmodell ansieht (Abbildung 2.28), da diese ja offensichtlich im Vergleich zu den Vorteilen überwiegen müssen. Hier stellt sich eindeutig der hohe Zeitbedarf als gravierendster Nachteil heraus. Rodríguez (Rodríguez, 2010) erhob zudem noch die Dauer einer Untersuchung und der Aufbereitung des dazugehörigen Szenarios digitaler Menschmodelle. Hier gaben 48% der Befragten an, dass sowohl die Aufbereitung als auch die Durchführung einer Untersuchung länger als 60 Minuten benötigen.

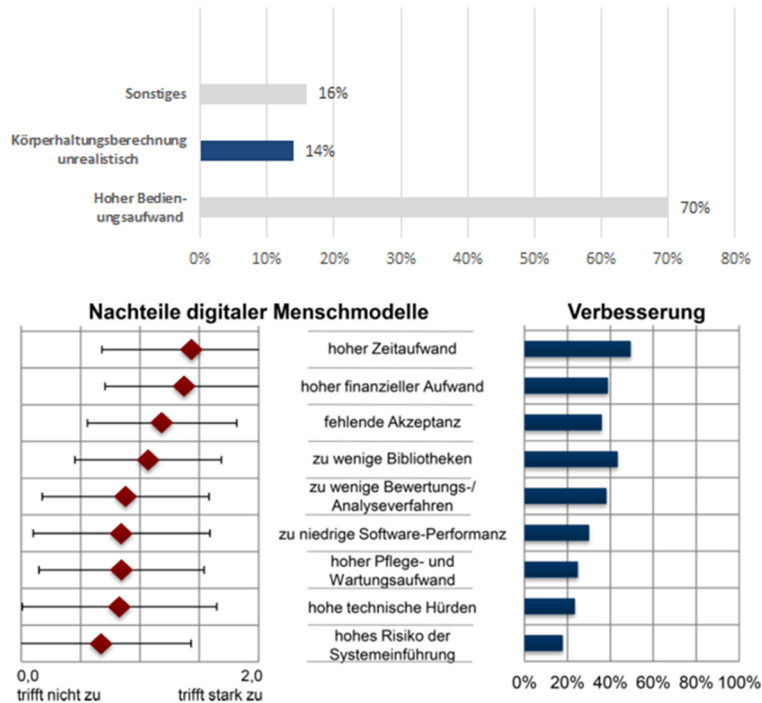


Abbildung 2.28: Nachteile digitaler Menschmodelle (oben: in Anl. an Rodríguez (2010), unten: in Anl. an Mühlstedt (2012))

Erkenntnisse, wofür die Anwender so viel Zeit benötigen, zeigt die folgende Abbildung, die angibt, wie oft die Anwender bestimmte Manipulations-Funktionen des Menschmodells nutzen, wie wichtig sie diese einschätzen und inwiefern sie Verbesserungsbedarf sehen. Hier stellt sich insbesondere heraus, dass das Anpassen der Körperhaltung die Funktion ist, die zum einen am häufigsten genutzt wird und zum anderen auch von den Anwendern als wichtigste Funktion angesehen wird. Zudem geben rund zwei Drittel der Befragten an, dass sie hier Verbesserungsbedarf sehen.

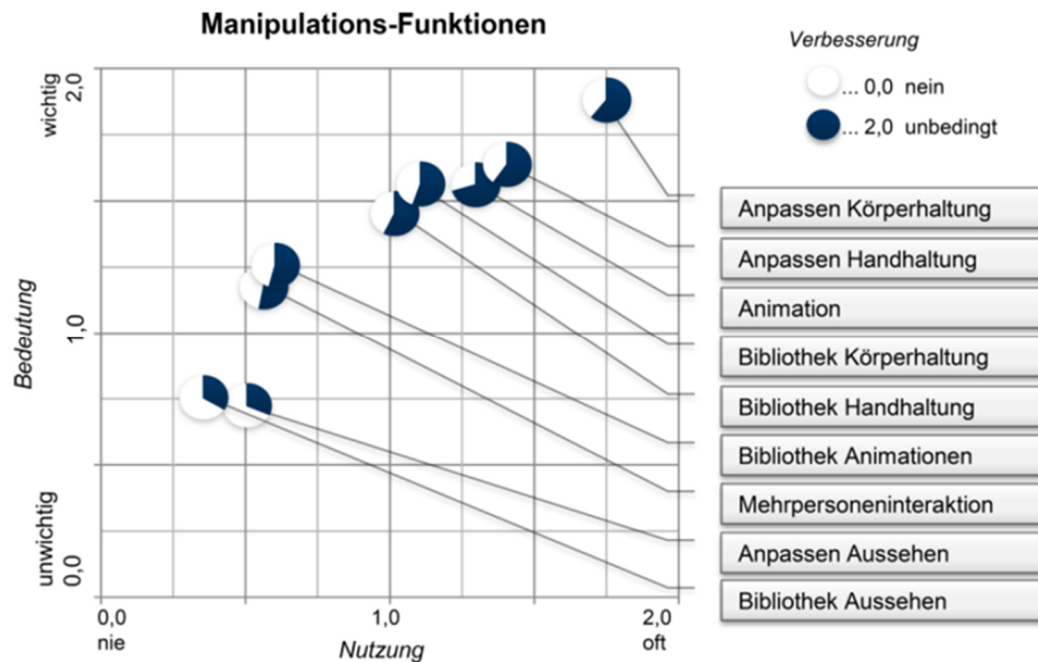


Abbildung 2.29: Bedeutung, Häufigkeit der Nutzung und Verbesserungsbedarf von Manipulationsfunktionen digitaler Menschmodelle (in Anl. an Mühlstedt, 2012)

Des Weiteren wurde von Mühlstedt (Mühlstedt, 2012) erhoben, welche Eingabegeräte wie oft für die Untersuchungen verwendet werden (Abbildung 2.30). Es zeigt sich, dass die Untersuchung überwiegend mit der Tastatur und Maus oder gelegentlich auch mit der *SpaceMouse* durchgeführt wird. Ebenfalls zeigt sich, dass die Anwendung der Motion-Capture-Technologie eher die Ausnahme darstellt. Datenhandschuhe und haptische Eingabegeräte spielen in der praktischen Anwendung keine nennenswerte Rolle. Auch wenn die neben der Tastatur und Maus bestehenden Eingabegeräte relativ selten Anwendung finden, besteht hier allerdings ein vermehrtes Interesse der Anwender an der Weiterentwicklung dieser Geräte.

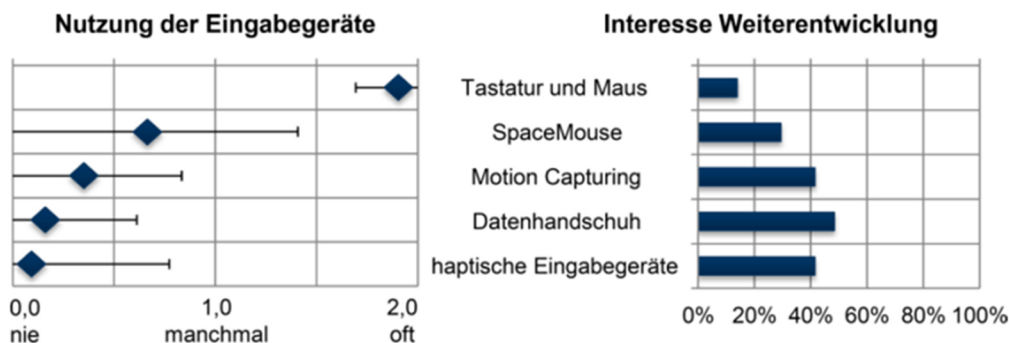


Abbildung 2.30: Häufigkeit der Verwendung und Verbesserungsbedarf genutzter Eingabegeräte (in Anl. an Mühlstedt, 2012)

Eine weitere Studie zur Bewertung manueller Arbeitsprozesse führte das Bundesamt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Wischniewski, 2013) durch. Bei dieser Studie wurden 60 ausgewiesene Experten (Rückmeldungsquote 55%) mit dem Hauptaugenmerk auf die Einschätzung der Zukunft der „digitalen Ergonomie“ befragt.

Nach Einschätzung der Experten wird die Komplexität digitaler Menschmodelle in Zukunft ansteigen. Dies zeigt sich unter anderem daran, dass als wichtiger Trend zwischen 2015 und 2020 erwartet wird, dass die anthropometrische und biomechanische Varianz des Menschen stärkere Berücksichtigung finden soll. Ebenso stellt nach Ansicht der Experten ein wichtiger Trend zwischen 2020 bis 2025 dar, dass ebenfalls kognitive Prozesse des Menschen simuliert werden.

Obwohl erwartet wird, dass die Menschmodelle komplexer werden, wird als wichtiger Trend zwischen 2015 und 2020 auf der anderen Seite erwartet, dass die Gebrauchstauglichkeit digitaler Ergonomietools steigt, sodass eine eingeschränkte Bedienung auch als „Laie“ möglich sein wird. Ein Element soll dabei die stärkere Verwendung und Anbindung der Motion-Capturing-Technologie sein. Ebenfalls als tendenzieller Trend zwischen 2020 und 2025 sehen die Experten, dass Dateneingaben, statt mit klassischen Eingabegeräten, über Gesteninteraktion oder weiteren Eingabegeräten erfolgt.

Darüber hinaus wird erwartet, dass die Anwendung der Bewertung von Arbeitssystemen mithilfe digitaler Menschmodelle steigt. Dies äußert sich dadurch, dass als wichtiger Trend angenommen wird, dass zwischen 2020 und 2025 Unternehmen nur noch in Ausnahmesituationen Realversuche durchführen und dass die Absicherung über Ergonomiesimulation fest in den Ablaufstrukturen mittelständischer und Großunternehmen verankert ist.

2.3 Benutzungsschnittstellen und Eingabegeräte

2.3.1 Mensch-Computer-Interaktion und Benutzungsschnittstellen

Datenverarbeitung in jeder Form beruht immer auf dem Prinzip der *Eingabe, Verarbeitung, Ausgabe* (Abbildung 2.31), gleiches gilt für jedes Computerprogramm (Ernst et al., 2015), einschließlich Tools zur Ergonomiesimulation. Ist in diesem Kontext ein Benutzer eingebunden, treten Mensch und Computer in Wechselwirkung, was als *Mensch-Computer-Interaktion* verstanden wird (Herczeg, 2009).



Abbildung 2.31: Aufbau von Digitalrechnern nach den Prinzip Eingabe, Verarbeitung und Ausgabe (in Ernst et al., 2015)

Ein- und Ausgabe bei der Mensch-Computer-Interaktion werden über die Benutzungsschnittstelle bzw. über das User Interface kommuniziert. Nach ISO 9241-110 umfasst die Benutzungsschnittstelle „*alle Bestandteile eines interaktiven⁶ Systems (Software oder Hardware), die Informationen und Steuerelemente zur Verfügung stellen, die für den Benutzer notwendig sind, um eine bestimmte Arbeitsaufgabe mit dem interaktiven System zu erledigen*“.

Im Folgenden wird die Entwicklung der Mensch-Computer-Interaktion nach van Dam (van Dam, 1997) und Preim & Dachzelt (Preim & Dachzelt, 2015) aufgezeigt.

1950er bis 1960er Jahre: Stapelverarbeitung⁷

In dieser Zeit wurden die Computer noch mit Lochkarten als Eingabe und Zeilendrucker als Ausgabegeräte ausgestattet und es gab noch keine Benutzungsschnittstelle, da die Computersysteme in der Betriebsart der Stapelverarbeitung betrieben wurden.

1960er bis 1980er Jahre: Kommandozeilen

Benutzer konnten zum ersten Mal mit dem Computer interagieren, indem über eine Tastatur Kommandos mit Parametern eingegeben wurden. Diese Art der Bedienung blieb im Zeitalter der Personal Computer bestehen, indem sie in Betriebssysteme wie DOS und UNIX übernommen wurden. Auch in heutigen Betriebssystemen ist meist noch eine Kommandozeilen-Schnittstelle vorhanden.

1980er bis heute: Windows, Icons, Menus und Pointer sowie Graphical User Interfaces
Die dritte Generation von Benutzungsschnittstellen brach während der 1970er am Xerox PARC an, die auf Rastergrafik und *Windows, Icons, Menus und Pointer* (Fenster, Symbole, Menüs und Zeiger) basierten. Graphical User Interfaces auf Basis

⁶ „Als *interaktiv* wird ein System bezeichnet, bei dem der Benutzer durch Bedienhandlungen den Arbeitsablauf des Systems beeinflussen kann“ (Heinecke 2012)

⁷ „*Stapelverarbeitung (batch processing)* ist ein Betrieb eines Computersystems, bei dem das Programm Eingabedaten abarbeitet, die beim Start komplett ... vorliegen, und die gewünschten Ausgaben erzeugt, ohne dass während des Programmablaufes menschliche Eingriffe erfolgen“ (Heinecke 2012)

von Windows, Icons, Menus und Pointer wurden 1984 im Macintosh und später ebenfalls in Windows-PC und UNIX-Workstation verwendet. Die heutigen Anwendungen werden häufig noch von diesem Stil dominiert. Der Zeiger wurde bzw. wird hierbei typischerweise mit der Maus gesteuert.

Ab 1990er: Post Windows, Icons, Menus und Pointer User Interfaces

Diese Art der Benutzungsschnittstellen greifen nicht mehr allein auf das dominierende Muster der mausbasierten Interaktion mit Menüs und Graphical-User-Interface-Elementen auf einer 2D-Oberfläche zurück. Es werden hierbei hingegen alternative Interaktionskonzepte wie Gestensteuerung, Spracheingabe oder Augensteuerung verwendet.

Im Zusammenhang mit Post Windows, Icons, Menus und Pointer User Interfaces wird auch von einer natürlichen Benutzungsschnittstelle bzw. von Natural User Interfaces gesprochen. Diesen Begriff definieren Preim und Dachzelt wie folgt:

„Eine natürliche Benutzungsschnittstelle ist ein System zur Mensch-Computer-Interaktion, mit dem Benutzer mittels intuitiver und zumeist direkter Bedienhandlungen interagieren, die einen klaren Bezug zu natürlichen, realweltlichem, menschlichen Alltagsverhalten aufweisen. Natürlich heißt dabei nicht angeboren, sondern bezieht sich auf dem Benutzer durch den Alltag vertraute und erlernte Handlungen, die Benutzern im Moment der Interaktion als angemessen erscheinen.“ (Preim & Dachzelt, 2015)

Nachdem Windows, Icons, Menus und Pointer und Graphical User Interfaces in Einheit mit klassischen Desktop-Computern über Jahrzehnte eine vorherrschende Stellung einnahmen, wird diese zunehmend durch Natural User Interfaces mit wesentlich diversifizierterer Hardware verdrängt. Dies gilt neben dem privaten Umfeld auch für das berufliche Umfeld, in dem der Desktop Computer nur noch eine von vielen Ausprägungen darstellt. Ersetzt wird dieser durch eine Vielzahl an Geräten mit Natural User Interfaces, wie etwa Smart Phones und Tablet-Computer, intelligente Uhren und Fernseher, interaktive Tische und Wandbildschirme bis etwa hin zum Auto-Cockpit. (Steimle et al. 2014)

2.3.2 Eingabegeräte

Ein Eingabegerät ist ein *„benutzergesteuertes Gerät, das zu einem System Informationen übermittelt“* (ISO 9241-400). Es stellt den hardwaretechnischen Anteil des User Interface dar, der für die Kommunikation vom Benutzer in Richtung System zuständig ist. Typ und Beschaffenheit des Eingabegeräts tragen einen wichtigen Teil dazu bei, mit welcher Leistungsfähigkeit ein Benutzer eine Aufgabe im Rahmen der Mensch-Computer-Interaktion durchführen kann. Auch wenn die Tastatur und Maus im Zuge der enormen Verbreitung der

Windows, Icons, Menus und Pointer User Interfaces eine herausragende Stellung einnimmt, existieren eine Vielzahl unterschiedlicher Eingabegeräte. Allein die ISO 9241-400 listet 25 unterschiedliche Eingabegeräte auf mit dem Vermerk, dass diese Auflistung unvollständig sei. Eine Einteilung der Eingabegeräte kann, gem. Abbildung 2.32, nach unterschiedlichen Kriterien vorgenommen werden. Eine Art der Einteilung kann dabei nach der Körperbewegung für die Betätigung erfolgen, wobei hier neben den konkreten Körperteilen, mit denen die Betätigung erfolgt, auch die Sprache und die Bewegung berücksichtigt wird. Eine weitere Möglichkeit ist die Einteilung nach Elementaraufgaben. Zum Beispiel kann mit einer Tastatur Codeeingaben vorgenommen werden oder das Zeigen⁸ kann entweder indirekt mit einer Maus oder direkt mit dem Finger über ein Touchscreen erfolgen. Eine weitere Unterscheidung kann nach den Freiheitsgraden des Eingabegeräts vorgenommen werden. Hier unterscheidet die ISO 9241-100 lediglich nach ein-, -zwei- oder dreidimensionalen Eingabegeräte, wobei darüber hinaus auch Eingabegeräte mit wesentlich mehr Freiheitsgraden existieren, wie es etwa bei Datenhandschuhen der Fall ist (Heinecke, 2012). Ebenfalls kann eine Unterscheidung nach der erfassten Größe des Eingabegeräts erfolgen.

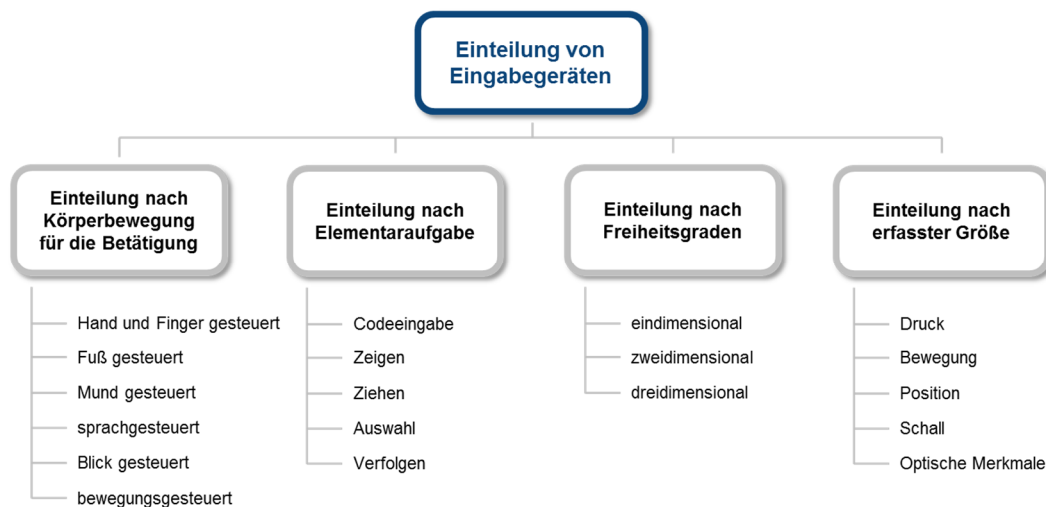


Abbildung 2.32: Einteilungen von Eingabegeräten (in Anl. an ISO 9241-400)

Das Auswahlkriterium, nach dem bestimmt wird, ob sich ein Eingabegerät für eine bestimmte Aufgabe eignet, ist maßgeblich die Gebrauchstauglichkeit nach ISO 9241-11 (siehe Unterabschnitt 4.1.1). Hierbei wird bewertet, mit welcher Effektivität, Effizienz und Zufriedenstellung die Benutzer eine Aufgabe erfüllen können. Mit der weiten Verbreitung der Windows, Icons, Menus und Pointer User Interfaces ähneln sich auch die Aufgaben, die bei der Bedienung durchgeführt werden müssen. Diese sind im Wesentlichen die Interaktion auf einer 2D-Benutzeroberfläche und Codeeingaben. Die weite Verbreitung der Kombination von

⁸ *Zeigen* ist das „Bedienen bei einer graphischen Benutzungsoberfläche, bei der ein Eingabegerät benutzt wird, um ein kleines Objekt (wie einen Zeiger) zu einer bestimmten Stelle auf der Anzeige zu bewegen“ (ISO 9241-400)

Tastatur und Maus als Eingabegerät, zeigt, dass diese sich für diese Art der Mensch-Computer-Interaktion sehr gut eignen. Ebenfalls zeigt sich aber auch, dass bei Änderung des User Interfaces diese Kombination der Eingabegeräte nicht immer optimal ist. Ein Beispiel stellt hier die Interaktion bei 3D-Anwendungen dar, in denen Objekte im dreidimensionalen Raum manipuliert werden. Dieser Raum ist hierbei über die Projektion am Bildschirm für den Nutzer einsehbar. Dies ist beispielhaft bei der Arbeit mit 3D-CAD-Systemen der Fall. Bereits Hinkley (Hinkley, 1996) zeigt, dass sich hier frei im Raum manipulierbare Eingabegeräte besser eignen als die Maus mit ihren zwei translatorischen Freiheitsgraden. Es liegt die Vermutung nahe, dass sich dieser Effekt bei der Manipulation kinematischer Ketten von digitalen Modellen verstärkt, bei denen die Anzahl der Freiheitsgrade i.d.R. noch größer ist.

2.3.3 Graspable und Tangible User Interfaces

Graspable und Tangible User Interfaces sind spezielle Arten des Natural User Interface, die sehr stark auf der direkten physikalischen Interaktion über die Eingabegeräte basieren.

Fitzmaurice et al. (Fitzmaurice et al., 1995) konzipieren das Konzept der Graspable User Interfaces, dessen Begrifflichkeit sie wie folgt definieren:

“Graspable User Interfaces ... allow direct control of electronic or virtual objects through physical handles for control”

Sie skizzierten ein Beispiel eines Graspable User Interface, mit dem man mit kleinen, physikalischen Klötzen (Bricks), die auf einem horizontal angeordneten Bildschirm liegen, zweidimensionale virtuelle Objekte in Lage und Form manipulieren kann. Dies erfolgt, indem ein Klotz oder mehrere den virtuellen Objekten direkt zugeordnet werden und die Lage und Orientierung der Klötze dann verändert wird.

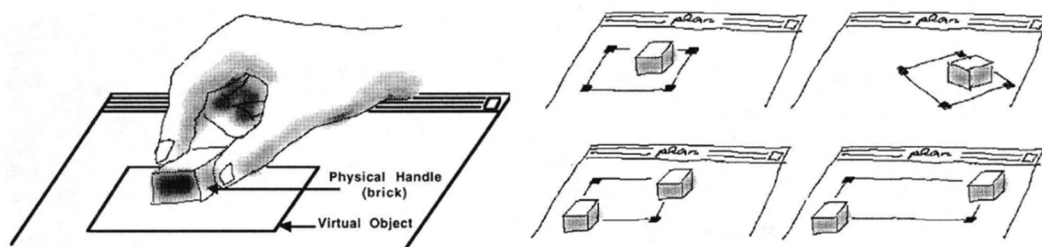


Abbildung 2.33: links: Brick bei der Handhabung, rechts: Manipulation von Lage und Form mittels Bricks (Fitzmaurice et al., 1995)

Tangible User Interfaces gehen noch über das Konzept des Graspable User Interface hinaus, indem alltägliche Gegenstände nicht einfach nur mit virtuellen Objekten gekoppelt, sondern auch noch mit digitalen Informationen überlagert werden, sodass Ein- und Ausgabegerät zunehmend verschmelzen.

Ishii & Ullmer (Ishii & Ullmer, 1997) definieren diese Art des User Interface wie folgt:

Tangible User Interfaces “will augment the real physical world by coupling digital information to everyday physical objects and environments.”

Durch Abbildung 2.34 wird anschaulich das Gerüst des Tangible User Interface erläutert und mit dem klassischen Graphical User Interface verglichen. Beim Tangible User Interface stellt das Eingabegerät eine greifbare Repräsentation eines digitalen Modells dar, z.B. ein Modell eines Gebäudes. Anhand digitaler Informationen und einer nicht greifbaren, virtuellen Repräsentation wird dieses reale Modell dann mit digitalen Informationen überlagert, z.B. durch Darstellung eines Schattens.

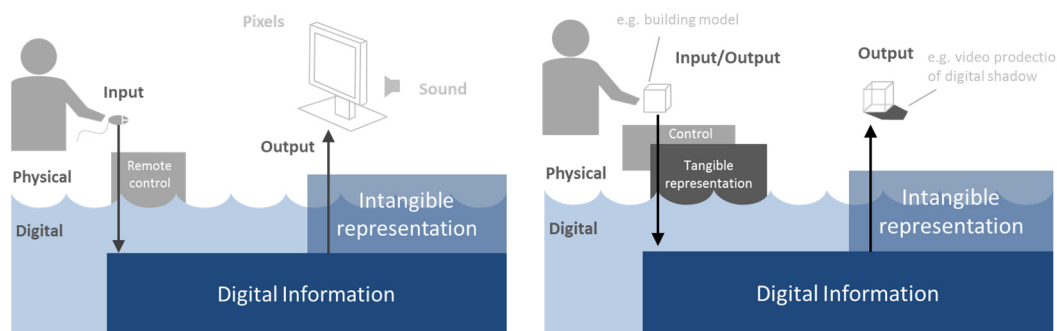


Abbildung 2.34: Vergleich zwischen Graphical User Interface (links) und Tangible User Interface (rechts) (in Anl. an Ishii, 2008)

Eine konkrete Darstellung dieses Beispiels ist in Abbildung 2.35 dargestellt. Auf der linken Seite ist eine Simulation des Schattenwurfs von Gebäuden dargestellt. Die physikalischen Modelle von Gebäuden werden durch die Hand in ihrer Position und Orientierung verschoben und in Abhängigkeit von der Uhrzeit wird dann der Schatten über eine Projektion eingeblendet. Im rechten Bild werden zudem noch Informationen über den Luftstrom eingeblendet.

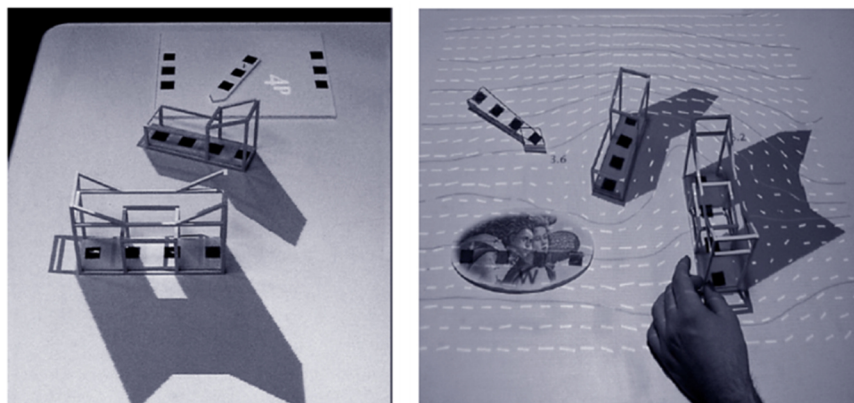


Abbildung 2.35: Simulation von Schattenwurf und Luftströmen von Gebäuden über ein Tangible User Interface (Ishii, 2008)

2.3.4 Beispiele von Graspable und Tangible User Interfaces zur Manipulation der kinematischen Kette eines digitalen Modells

Im Folgenden werden einige Projekte aufgezeigt, mit denen entweder über ein Graspable oder ein Tangible User Interface die Winkelstellung der kinematischen Kette eines digitalen Modells verändert wird. Sie stellen somit eine spezielle Art dieser User Interfaces dar. Die Eingabegeräte sind hierbei jeweils physikalische, gegliederte Modelle des zu manipulierenden digitalen Modells. Fast alle folgenden Projekte stellen dabei eine Repräsentation von Graspable User Interfaces dar, bei denen die Ausgabe über den klassischen Bildschirm erfolgt und nicht über eine Überlagerung digitaler Information auf dem Eingabegerät.

Dinosaur Input Device (1995/1998)

Knep et al. (Knep et al., 1995) berichten vom Einsatz des *Dinosaur Input Device*, das im Film *Jurassic Park* eingesetzt wurde. Zu der damaligen Zeit war auf der einen Seite ein großer Pool an Stop-Motion-Animatoren vorhanden, die Filme aus einer Vielzahl an einzelnen realen Bildaufnahmen, meist mithilfe von Puppen o. ä., erzeugen. Durch das *Dinosaur Input Device* sollten diese in ihrer gewohnten Art und Weise kurzfristig befähigt werden, Computergraphik-Szenen erstellen zu können, ohne den Umgang mit den komplexen, kommerziellen Tools zu erlernen.

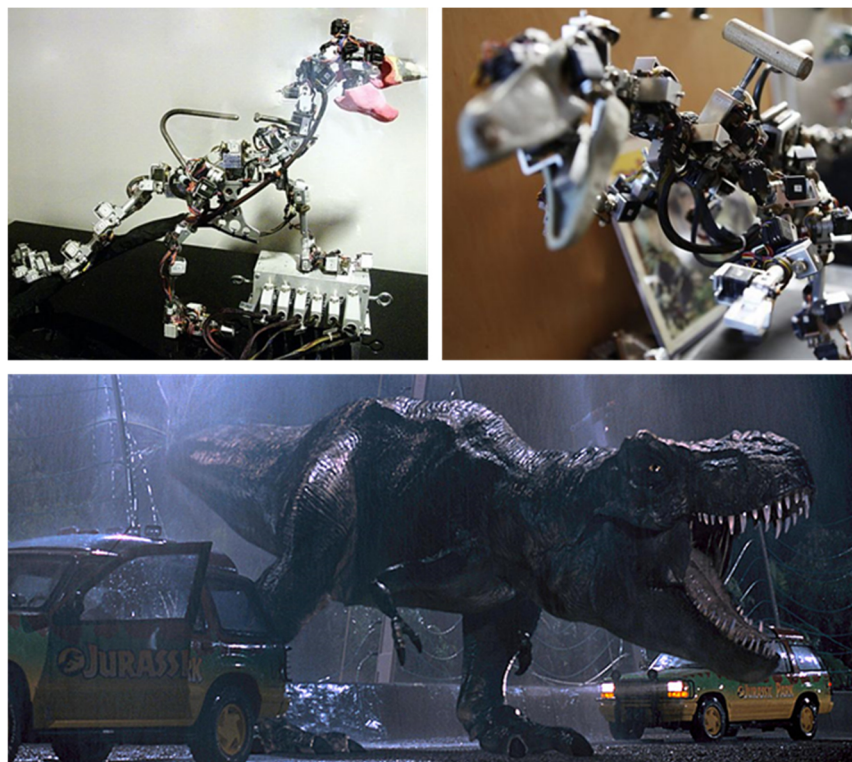


Abbildung 2.36: oben: Das *Dinosaur Input Device* (Knep, B.), unten: Szene aus dem Film *Jurassic Park* (Bauer Consumer Media Ltd.)

Das Eingabegerät bildet das Skelett eines zu manipulierenden, virtuellen Dinosauriers nach. Es wurden 15 von insgesamt 52 computeranimierten Einstellungen (Shots) mit insgesamt vier verschiedenen *Dinosaur Input Devices* erstellt. Mit dem *Dinosaur Input Device* wurden Gelenkwinkel und die globale Position des Eingabegeräts (über ein Stativ) als Keyframe auf das digitale Modell übertragen. Als Sensoren wurden in Kunststoffgehäuse gekapselte, inkrementelle, optische Encoder mit einer Größe von $\frac{3}{4}$ Zoll (≈ 19 mm) verwendet, mit denen Winkeländerungen von größer als $1/3^\circ$ erfasst werden konnten. Mit je einem Encoder kann die Winkeländerung eines Freiheitsgrades erfasst werden. Mehrdimensionale Gelenke wurden durch eine entsprechende Anzahl seriell angeordneter Gelenke ersetzt. Die *Dinosaur Input Devices* verfügten über bis zu 74 Freiheitsgrade und eine Größe von bis zu 3 Fuß (ca. 914 mm) vom Kopf bis zur Schwanzspitze. Die Kommunikation erfolgte über eine eigens erstellte Controller Box mit der Workstation, auf der die Animationssoftware ausgeführt wurde. Die Aktualisierungsrate des digitalen Modells betrug 1 Hz.

Diese Möglichkeit der Benutzereingabe bei der Computeranimation wurde weiterentwickelt und 1998 im Film *Starship Troopers* eingesetzt, um Bewegungen sog. *Bugs* zu erzeugen (Hayes, 1998). Verallgemeinert wurde das Eingabegerät nun als *Digital Input Device* bezeichnet. Neben der Übertragung von Keyframes an eine Animationssoftware gab es ebenfalls die Möglichkeit, ganze Bewegungssequenzen aufzuzeichnen und zu übertragen, was insbesondere für die Generierung von Bewegungen der *Bugs*, die sich im Hintergrund befanden, genutzt wurde. Insgesamt wurden 225 Einstellungen mithilfe des *Digital Input Device* erzeugt.

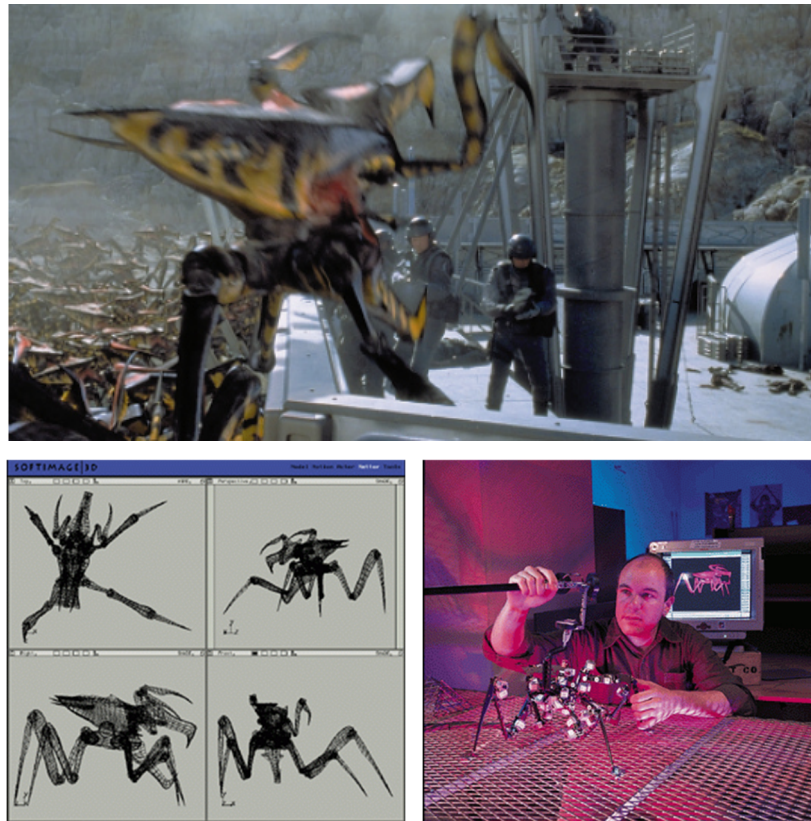


Abbildung 2.37: oben: Filmausschnitt mit einem *Bug* (Hayes, 1998), unten: Gitternetzlinien des 3D Modells eines *Bugs* sowie das *Digital Input Device* (Robertson, 1997)

Monkey (1995/1998)

Vom ersten menschenähnlichen Eingabegerät schreiben Esposito et al. (Esposito et al., 1995). Es bildet mit insgesamt mit 35 Freiheitsgraden das Skelett des 50. Perzentils der männlichen nordamerikanischen Bevölkerung im Maßstab von 1:3 ab. Zusätzlich erfasst es über ein Stativ die globale Orientierung des Eingabegeräts im Raum. Ziel der Entwicklung war es, das Eingabegerät im Rahmen der Flugzeugentwicklung einzusetzen. Dort sollten mithilfe eines digitalen Menschmodells digitale Prototypen bezüglich Wartung, Einsehbarkeit und Erreichbarkeit abgesichert werden. Als Sensoren wurden Leitplastik-Potentiometer verwendet. Es konnten Winkel mit einer Genauigkeit von 3° in einer Auflösung von $0,3^\circ$ erfasst werden.

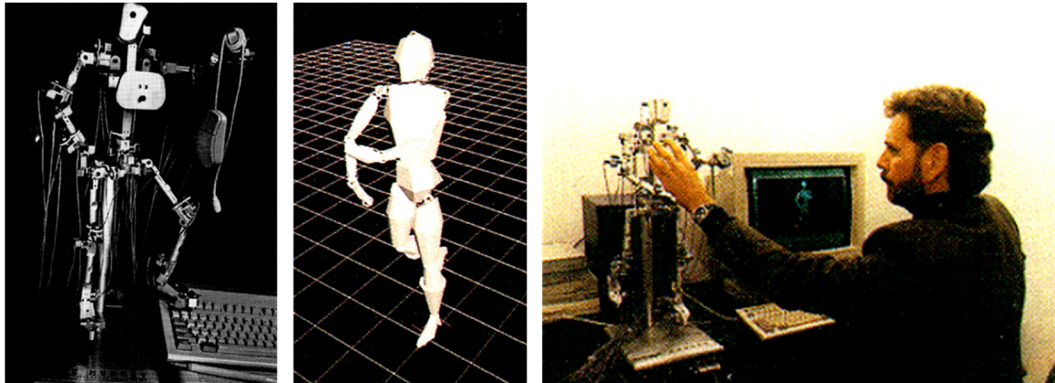


Abbildung 2.38: Das *Monkey*-Eingabegerät sowie das damit manipulierte Menschmodell (Esposito & Paley, 1995)

Auch dieses Eingabegerät wurde weiterentwickelt (Bradford Paley, 1998). Die Weiterentwicklungen am *Monkey 2* dienten größtenteils dazu, die Akzeptanz der Anwender zu erhöhen. Das Eingabegerät wurde mattschwarz lackiert, die Steifheit der Gelenke wurde optimiert, die Farben der Leitungen wurden geändert und es wurden Leuchtdioden hinzugefügt, die leuchten, wenn Änderungen der Gelenkwinkel vorgenommen wurden. Ziel war es, den Anwendern ein Gefühl von Einfachheit eines eigentlich komplexen Eingabegeräts zu vermitteln.

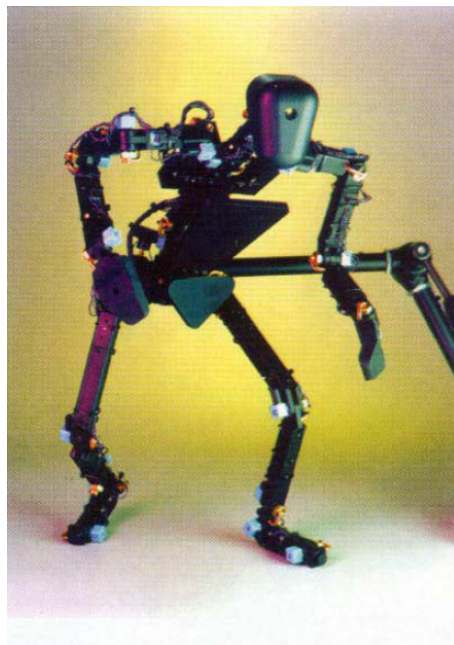


Abbildung 2.39: *Monkey 2* (Bradford Paley, 1998)

Cyber Bunraku (1997)

Hitachi und Fuji Television Network entwickelten 1997 einen Prototyp eines *Cyber-Bunraku*-Systems (Arai, 1997). Das klassische Bunraku ist ein traditionelles japanisches Puppentheater, bei dem zwei Puppenspieler die Körperbewegung steuern und einer den Gesichtsausdruck.

Bei dem entwickelten *Cyber-Bunraku*-System wurde keine reale Puppe gesteuert, sondern ein digitales Modell. Hierbei wird ein elektromechanisches Skelett verwendet, mit dem der Oberkörper eines digitalen Menschmodells gesteuert wird. Der Gesichtsausdruck wird durch ein optisches Motion-Capture-System kontrolliert.



Abbildung 2.40: Das *Cyber-Bunraku*-System (Arai, 1997)

Verwendung einer Gliederpuppe zur Augmented Reality Animation anthropomorpher Charaktere (2005)

Barakonyi & Schmalstieg (Barakonyi & Schmalstieg 2005, 2006) zeigen anhand von Demonstrationsanwendungen den möglichen Einsatz von Augmented Reality im Bereich der Computer-Entertainment-Entwicklung. Unter anderem zeigen sie eine mit Motion-Capture-Sensoren bestückte Gliederpuppe, die als Eingabegerät für die Computeranimation anthropomorpher Charaktere dient. Von den Sensoren werden Lage und Orientierung der Endeffektoren (Kopf, Hände und Füße) der Gliederpuppe erfasst. Aus diesen Daten wird über

inverse Kinematik die Körperhaltung des virtuellen, zu animierenden Charakters bestimmt. Mithilfe eines Head Mounted Display wird für den Benutzer das Bild der Gliederpuppe mit dem des virtuellen Charakters überlagert. Im Gegensatz zu den übrigen vorgestellten Beispielen zur Manipulation der kinematischen Kette eines digitalen Modells, die jeweils Graspable User Interfaces darstellen, kann dieses Beispiel zur Gruppe der Tangible User Interfaces zugeordnet werden. Charakteristisch ist hierbei, dass über das Head Mounted Display, die Gliederpuppe mit den digitalen Informationen überlagert werden.



Abbildung 2.41: links: Gliederpuppe mit Sensoren, Mitte: Gliederpuppe mit überlagerten Animations-Charakter, rechts: Bedienung der Gliederpuppe (Barakonyi & Schmalstieg, 2006)

Posey (2006)

Posey ist ein nach dem Baukastenprinzip rekonfigurierbares Eingabegerät (Weller et al. 2006). Ziel von *Posey* ist die Entwicklung eines Eingabesystems für Kinder zum Spielen und Lernen. Durch Verstrebungselemente mit Kugeln an den Enden und unterschiedlichen Knotenelementen mit dazu passenden Kugelpfannen können aus dem Baukasten Skelette unterschiedlicher Formen zusammengesetzt werden. Sensoren erfassen die Topologie und Geometrien über optoelektrische Kopplung von Kugel und Kugelpfanne. Werden Bauteile in der Realität zusammengesetzt, geschieht dies ebenfalls in der virtuellen Umgebung. Zudem werden die Winkelstellungen des physischen Skeletts auf das virtuelle Modell übertragen. Die Kugeln der Verstrebungselemente sind mit mehreren Infrarot-LED ausgestattet, die eine einzigartige Adresse senden. In die Kugelpfannen sind Fototransistoren integriert, die ggf. Signale von gegenüberliegenden LED lesen können. Die dreidimensionale Winkelstellung (mit einer Genauigkeit von 20°) ergibt sich dann aus der Kombination von gegenüberliegenden LED und Fototransistoren. Es lassen sich Nickwinkel im Bereich von max. 200° und Gierwinkel von max. 150° verändern. Die Rollwinkel hingegen sind unbegrenzt.



Abbildung 2.42: oben: *Posey* bei der Benutzung, unten Skelett-Modell und animiertes Modell eines fiktiven Charakters (Weller et al., 2006)

Verwendung einer Gliederpuppe für die Suche in Motion-Capture-Daten (2008)

Fling & Jiang (Fling & Jiang, 2008) stellen ein Eingabegerät in Form einer Gliederpuppe vor, mit dem Motion-Capture-Daten durchsucht werden können. Die Gelenke der Gliederpuppe sind in unterschiedlichen Farben, der Rest des Körpers in schwarz lackiert. Die Pose der Gliederpuppe wird mithilfe eines Stereokamerasystems erfasst, indem die dreidimensionalen Positionen der Gelenke rekonstruiert werden. Bei verdeckten Gelenken muss die Puppe solange gedreht werden, während das Kamerasystem Aufnahmen erzeugt, bis die verdeckten Gelenke ersichtlich sind. Die resultierenden Keyframes dienen dann als Eingabe für eine Abfrage von Motion-Capture-Daten. Hierdurch können z.B. für eine Animation existierende Motion-Capture-Daten wiederverwendet werden.

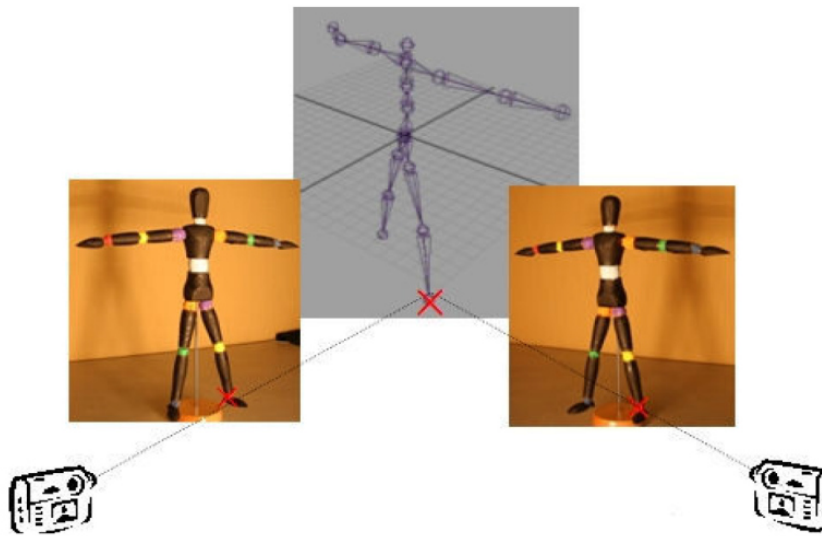


Abbildung 2.43: Aufgenommene Kamerabilder der Gliederpuppe und daraus resultierendes Skelettmodell (Feng & Jiang, 2008)

Angetriebene Puppe als Eingabegerät für ein digitales Menschmodell (2011)

Yoshikazi et al. (Yoshikazi et al., 2011) entwickelten ein aktives Eingabegerät in Form einer Puppe, das über angetriebene Gelenke verfügt. Primäres Ziel ist es, das Eingabegerät beim Einsatz von Menschmodellen für die Produktentwicklung zu nutzen (z.B. für die Überprüfung von Einsehbarkeit und Erreichbarkeit). Jeder Freiheitsgrad eines Gelenkes wird mit einem Servomotor angetrieben. Mehrdimensionale Gelenke werden wie bei einigen, bereits vorgestellten (passiven) Eingabegeräten durch Hintereinanderschaltung einer entsprechenden Anzahl an eindimensionalen Gelenken ersetzt. Als Vorteile dieser aktiven Puppe gegenüber einer passiven nennen Yoshikazi et al. (Yoshikazi et al., 2011), dass mit der aktiven Version vordefinierte Posen eingenommen werden können, die dann im Anschluss editiert werden können. Weiterhin kann eine dynamische Anpassung der Gelenk-Steifheit auf ein konstantes Niveau erfolgen, um die Schwerkraft auszugleichen. Ebenfalls ist es möglich Gelenke dynamisch zu koppeln, bis hin zur Bewegung der Puppe mithilfe inverser Kinematik an den Endeffektoren. Die Puppe besitzt 32 Freiheitsgrade, hat eine Höhe von 40 cm und eine Aktualisierungsrate von 15 Hz. Zwei Freiheitsgrade der globalen Orientierung der Puppe werden über ein Stativ erfasst.

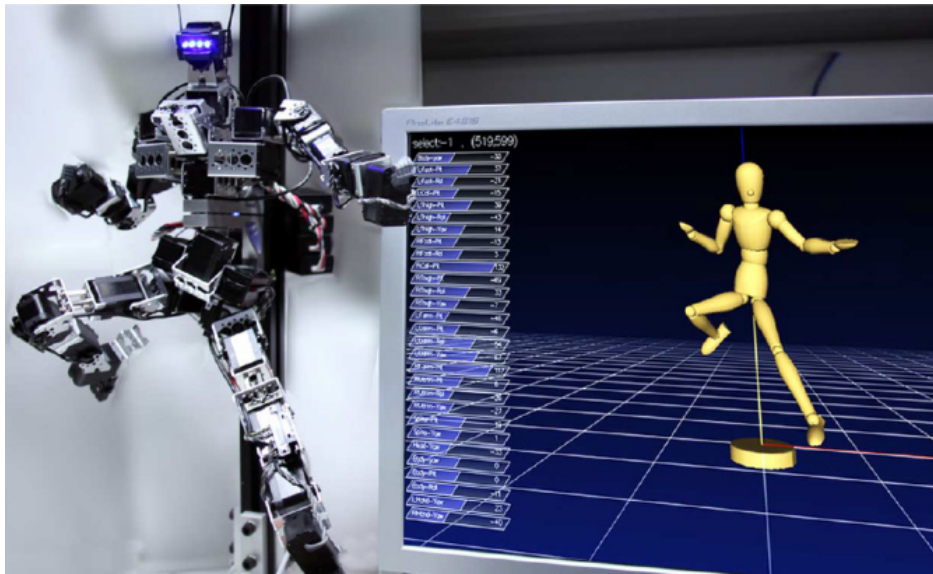


Abbildung 2.44: Eingabegerät und Menschmodell in virtueller Umgebung (Yoshikazi et al., 2011)

Ebenfalls führten Yoshikazi et al. (Yoshikazi et al., 2011) auch eine Nutzerstudie mit elf männlichen Teilnehmern durch, in der sie ihr Eingabegerät mit aktivierten Antrieben gegenüber der Maus sowie ihr Eingabegerät mit passiven Antrieben verglichen. Ziel war es zu zeigen, dass ihr Eingabegerät mit der Schwerkraftkompensation bei der Manipulation eines Menschmodells leichter und schneller zu bedienen ist. In einer neutralen virtuellen Umgebung sollte jeder Teilnehmer ein Menschmodell je Eingabemethode in drei unterschiedliche Posen bringen. Mit der Maus konnten die Teilnehmer dabei das Menschmodell über Vorwärts- oder inverser Kinematik kontrollieren. Nach spätestens drei Minuten wurde der Versuch abgebrochen. Es wurden die Dauer der Bedienung und die Genauigkeit erfasst. Ebenso wurden die Teilnehmer nach der Bedienung mithilfe eines Fragebogens befragt. Die Ergebnisse der Studie zeigt Abbildung 2.45. Dargestellt sind je Eingabemethode die Mittelwerte sowie die 95%-Konfidenzintervalle der Ausführungszeit, der Genauigkeit und die Ergebnisse der Befragung. Des Weiteren wurde mit einem Tukey-Kramer Test überprüft, ob die Abweichungen der Mittelwerte signifikant sind (Signifikanzniveau 5%). Die Ergebnisse zeigen, dass die Teilnehmer mit dem aktiven Eingabegerät signifikant schneller waren als mit der passiven Version. Ebenfalls waren die Teilnehmer mit dem passiven Gerät signifikant schneller als mit der Maus. Weiterhin war die Bedienung mit der Maus signifikant ungenauer als mit den beiden Versionen der Puppe, was nach Angaben der Autoren damit zusammenhängt, dass bei der Bedienung mit der Maus viele Teilnehmer nach drei Minuten den Posing-Vorgang noch nicht beendet hatten und deshalb noch eine große Winkelabweichung zur Zielpose vorlag. Bei der Befragung der Teilnehmer gaben diese zusammengefasst an, dass die aktive Puppe einfacher zu bedienen und zu erlernen sei als die passive Puppe und die Maus. Bei der Bewertung der Ergebnisse geben Yoshikazi et al.

(Yoshikazi et al., 2011) allerdings auch an, dass ihre passive Version des Eingabegeräts kein ideales, zugeschnittenes passives Eingabegerät darstellt. Somit ließen die Ergebnisse nicht schlussfolgern, dass aktive Eingabegeräte beim Posing generell besser seien als Passive.

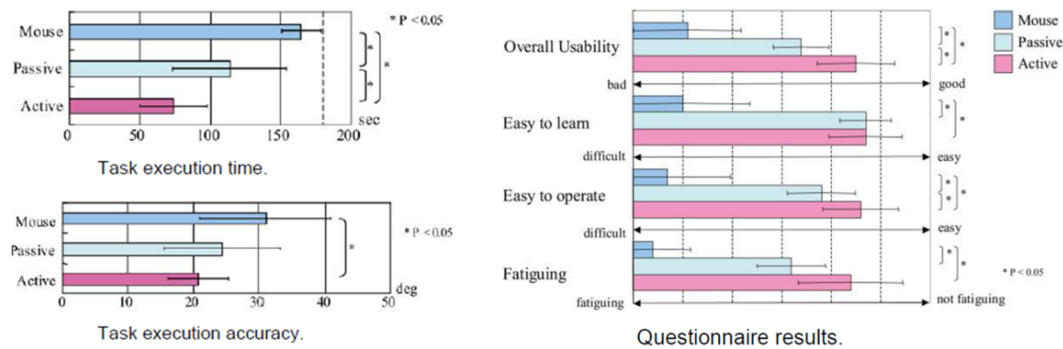


Abbildung 2.45: Ergebnisse der Nutzerstudie (Yoshikazi et al., 2011)

Qumarion (2012)

Qumarion ist ein von *CELSYS, Inc.* entwickeltes, menschenähnliches Eingabegerät in Form einer Puppe, das kommerziell vertrieben wird (*CELSYS, Inc.*). Einsatzzweck ist die Anwendung des Eingabegerätes bei der Computergrafik-Animation digitaler, menschenähnlicher Modelle. Die bisher nur in Japan erhältliche Puppe besitzt 16 Gelenke, deren Stellung mit 32 Sensoren und einer Aktualisierungsrate von 120 Hz überwacht werden. Die Maße der Puppe betragen 29 cm x 30,8 cm x 10,8 cm. Über eine Mini-USB 2.0 Schnittstelle kann das Eingabegerät in Maya und in 3ds Max (beide von Autodesk) sowie in Clip Studio (Celsys) genutzt werden.

Qumarion ist für die reine Anwendung in der Computer-Animation konzipiert und es werden keine Schnittstellen zu einem arbeitswissenschaftlichen, digitalen Menschmodell bereitgestellt. Inwiefern sich das Eingabegerät für den Einsatz in der Ergonomiesimulation eignet, ist fraglich, da die kinematischen Ketten von digitalen Menschmodellen aus der Computer-Animation häufig wesentlich einfacher sind als die von arbeitswissenschaftlichen Menschmodellen. Es ist nicht bekannt, inwiefern das Skelett des Eingabegerätes bestimmt wurde und ob es anthropometrische und biomechanische Regeln berücksichtigt. Aufgrund der beschränkten Verfügbarkeit und der nicht vorhandenen Schnittstellen kann die Eignung zur Steuerung arbeitswissenschaftlicher Menschmodelle im Rahmen dieser Arbeit nicht überprüft werden.



Abbildung 2.46: links: *Qumarion* mit Stativ, rechts *Qumarion* bei der Bedienung (CELSYS, Inc.)

Wandelbarer Joystick (2014)

Der *Wandelbare Joystick* ist ähnlich wie *Posey* ein auf einem Baukastenprinzip beruhendes, konfigurierbares Eingabegerät (Jacobson et al. 2014, Jacobson). Es dient der schnellen Skeletterstellung (Charakter Rigging) und Skelettmanipulation von virtuellen Modellen bei der Computergrafik-Animation. Über Hall-Sensoren und Magneten können die einzelnen Winkel des physischen Skeletts mit einer Genauigkeit von ca. 1° erfasst und mit einer Aktualisierungsrate von 120 Hz weitergegeben werden. In jedem Gelenk ist zudem ein Mikrocontroller integriert, der eine einzigartige ID zur Topologiebestimmung sendet.

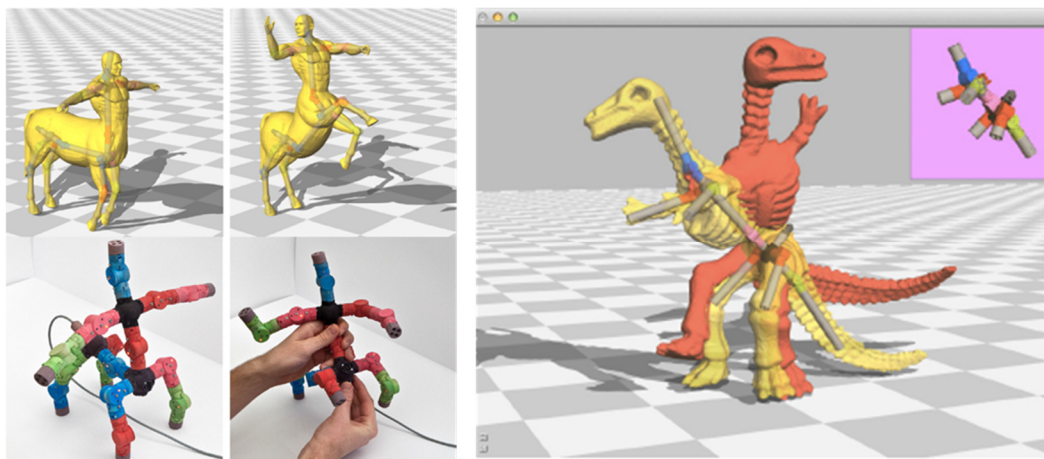


Abbildung 2.47: links: Der *Wandelbare Joystick* bei der Bedienung, rechts: Bildschirmanzeige während Versuch (Jacobson et al., 2014)

Auch Jacobson et al. (Jacobson et al., 2014) führten eine Nutzerstudie zum Character-Posing durch. Elf Teilnehmer mussten die Pose eines virtuellen Dinosauriermodells an eine Serie unterschiedlicher Zielposen mit der Maus und mit dem *wandelbaren Joystick* angleichen. Die Teilnehmer waren Hochschulangehörige im Alter von 23-26 Jahren. Sie hatten weder Erfahrung mit Animationssoftware noch mit der Art dieser Eingabegeräte. Bei der Bedienung mit der Maus war das User Interface identisch zu dem der Animationssoftware Maya von

Autodesk. Die Pose wurde dabei über Vorwärtskinematik eingestellt. Das Modell des Dinosauriers verfügte über 6 Gelenke und insgesamt 18 Freiheitsgrade. Die Teilnehmer entschieden nach eigenem Ermessen, wann die Zielpose erreicht war. Es wurden die Dauer und die Genauigkeit der Pose erfasst. Die Ergebnisse der Studie zeigt Abbildung 2.48. Es konnte kein signifikanter Unterschied zwischen der Genauigkeit und der Bearbeitungszeit zwischen der Bedienung mit der Maus und dem wandelbaren Joystick festgestellt werden. Die Abweichung zur Zielpose über die Zeit zeigt jedoch, dass man sich mit dem wandelbaren Joystick schneller der Zielpose annähert.

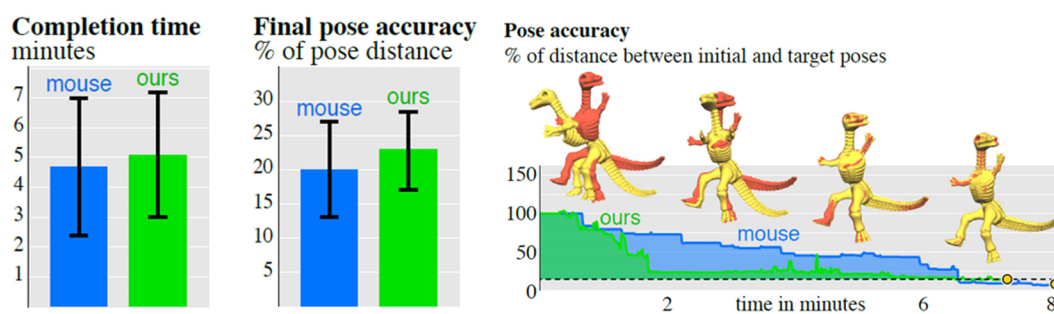


Abbildung 2.48: Ergebnisse der Nutzerstudie (Jacobson et al., 2014)

2.4 Zwischenfazit

In den vorangegangenen Abschnitten wurde zum einen aufgezeigt, dass die Digitale Fabrik eine Antwort der Unternehmen auf die geänderten Anforderungen aus dem wirtschaftlichen Umfeld darstellt. Der Einsatz digitaler Modelle, Methoden und Werkzeuge ermöglicht es, den Produktionsplanungsprozess schneller, flexibler und mit weniger Fehlern durchzuführen. Einen Teil der Digitalen Fabrik stellen hierbei digitale Menschmodelle und die Ergonomiesimulation dar. Diese machen es möglich, manuelle Arbeitsprozesse nach ergonomischen, zeitwirtschaftlichen und arbeitsmethodischen Gesichtspunkten zu untersuchen und zu verbessern. Studien zeigen allerdings, dass digitale Menschmodelle bzw. die Ergonomiesimulation nicht durchgängig und im Verhältnis zu anderen Methoden der Digitalen Fabrik relativ selten angewandt werden. Als größter Nachteil, und somit auch die größte Barriere für einen flächendeckenden Einsatz von arbeitswissenschaftlichen, digitalen Menschmodellen, wird der hohe zeitliche Bedienungsaufwand genannt. Diesbezüglich sind die Manipulation der Körperhaltung sowie die Generierung von Bewegungen des Menschmodells von maßgeblicher Bedeutung. Zur Manipulation der Körperhaltung von digitalen Menschmodellen steht über die Vorwärtskinematik ein Verfahren zur Verfügung, dass sich technisch zwar gut umsetzen lässt, allerdings gestaltet sich das Finden und das Einstellen der Winkel über ein Graphical User Interface als schwierig und zeitaufwändig. Im Gegensatz hierzu können Techniken der inversen Kinematik relativ schnell und einfach bedient werden,

sie führen aber häufig zu unrealistischen Körperhaltungen. Ebenfalls schnell und einfach lässt sich die Körperhaltung über Haltungsbibliotheken einstellen. Die aufgerufenen Körperhaltungen sind dabei allerdings nur in Ausnahmefällen auf das aktuelle Szenario abgestimmt. Ein ganz ähnliches Bild zeichnet sich bei den verschiedenen Möglichkeiten zur Generierung von Bewegungen des Menschmodells ab. Durch Keyframing lassen sich zwar individualisierte und auf die Einflüsse angepasste Bewegungen erzeugen, diese Technik erfordert jedoch einen hohen zeitlichen Aufwand. Demgegenüber lassen sich Methoden der parametrischen Bewegungsgenerierung schnell bedienen. Allerdings stößt diese Möglichkeit der Bewegungsgenerierung mit zunehmender Komplexität und Einflussgrößen an ihre Grenzen. Bewegungen auf Basis von Motion Capturing sind zwar prinzipiell realistisch, jedoch ist auch hier oftmals der Aufwand durch den Einsatz von Prototypen groß. Ebenfalls sind die Kosten für ein Motion-Capture-System mitunter nicht unerheblich. Insgesamt lässt sich schlussfolgern, dass es für eine umfangreichere Anwendung von arbeitswissenschaftlichen, digitalen Menschmodellen und der Ergonomiesimulation im Produktionsplanungsprozess neuer Instrumente und Methoden bedarf, die eine schnellere Generierung von Bewegungen und Anpassungen der Körperhaltung ermöglichen.

Zum anderen wurde als zweiter Aspekt beschrieben, dass ein tendenzieller Wandel des User Interface vorherrscht. Neben den nach wie vor weit verbreitetem Windows, Icons, Menus und Pointer User Interfaces, die klassischerweise auf dem Desktop PC betrieben werden, treten zunehmend Natural User Interfaces in Erscheinung. Der Wandel des User Interface betrifft dabei auch deren Hardwarekomponenten. Die Vergangenheit hat gezeigt, dass sich Tastatur und Maus als vorherrschende Kombination der Eingabegeräte bestens für den Einsatz in Windows, Icons, Menus und Pointer User Interface eignen. Die Eignung dieser Kombination ist allerdings vom Nutzungskontext abhängig. So weist die Maus mit den zwei Freiheitsgraden bei Manipulation von Objekten in virtuellen dreidimensionalen Räumen gegenüber frei im Raum manipulierbaren Eingabegeräten Defizite auf. Graspable und Tangible User Interfaces sind zwei spezielle Natural User Interfaces, die auf die Maus und Tastatur als Eingabegerät verzichten. Physikalische, be-greifbare Objekte dienen hier als Eingabegerät zur direkten Steuerung virtueller Objekte. In der Vergangenheit gab es verschiedene erfolgreiche Projekte, die überwiegend auf Basis von Graspable User Interfaces und teilweise über Tangible User Interfaces und spezieller be-greifbarer Eingabegeräte die Winkelstellungen kinematischer Ketten von digitalen Modellen verändern.

Es stellt sich nun die Frage, ob sich mit Hilfe eines Graspable User Interface bzw. mit Hilfe eines speziellen be-greifbarem Eingabegeräts die Manipulation der Körperhaltung oder die Generierung von Bewegungen arbeitswissenschaftlicher, digitaler Menschmodelle vereinfachen lassen, um den zeitlichen Aufwand bei der Bedienung dieser zu reduzieren. Eine Übertragung

der qualitativen und insbesondere der quantitativen Ergebnisse aus den vorgestellten Projekten auf diese Fragestellung ist nicht möglich, was im Folgenden erläutert wird.

Einerseits wurden die Versuche nicht mit einem arbeitswissenschaftlichen Menschmodell durchgeführt. Yoshikazi et al. (Yoshikazi et al., 2011) ließen mit ihrem Eingabegerät in den Versuchen eine virtuelle Gliederpuppe manipulieren. Die kinematischen Ketten arbeitswissenschaftlicher Menschmodelle sind demgegenüber komplexer und besitzen ein Vielfaches an Freiheitsgraden. In den Versuchen von Jacobson et al. (Jacobson et al., 2014) wurde ein einfaches Dinosaurier-Skelett betrachtet, das bereits von der Form eines einfachen Menschmodells abweicht. Offen ist demnach, ob es vorteilhaft ist, mit einem Graspable User Interface und dessen reduzierten Skelett ein komplexes, arbeitswissenschaftliches Menschmodell zu kontrollieren.

Ebenfalls wurden die digitalen Modelle bei der Manipulation im Rahmen der Nutzerstudien isoliert betrachtet. Bei der Erstellung von Ergonomiesimulation stellt dies jedoch die Ausnahme dar. Hier findet überwiegend eine Interaktion des digitalen Modells mit Betriebsmitteln und Produkten statt. Diese Interaktion kann ebenfalls Einfluss auf die Bedienung und deren Dauer haben. Zum Beispiel könnte das Posing des Menschmodells innerhalb einer Fahrzeugkarosserie dazu führen, dass der Benutzer aufgrund schlechter Einsehbarkeit sehr häufig die Bildschirm-Ansicht über die Maus ändern muss. Bei der Bedienung mit dem Graspable User Interface fallen dann Nebenzeiten an, in denen vermehrt von der Eingabepuppe auf die Maus umgegriffen werden muss, was letzten Endes die Bearbeitungszeit verlängert.

Weiterhin stellen die aufgezeigten Eingabegeräte keine idealen, auf arbeitswissenschaftliche Menschmodelle zugeschnittene, Eingabegeräte dar. Bezogen auf die quantitativen Untersuchungen stellt das Eingabegerät von Yoshikazi et al. (Yoshikazi et al., 2011) zwar ein Eingabegerät in menschenähnlicher Form dar, doch sie erwähnen ebenfalls, dass dieses kein ideales passives Eingabegerät ist. Dies ist dadurch begründet, dass der benötigte, größere Bauraum für die Antriebe die Form des Eingabegeräts beeinflusst. Mit der Baukasten-Lösung von Jacobson et al. (Jacobson et al., 2014) lassen sich lediglich Skelette zusammensetzen. Abgesehen davon, dass das Eingabegerät in den Versuchen das Skelett eines Dinosauriers darstellt, lassen sich auch keine Menschmodelle zusammensetzen, deren Skelette auf Basis anthropometrischer-Kriterien gestaltet sind. Bisher wurde noch kein Eingabegerät gestaltet, das speziell für ein arbeitswissenschaftliches Menschmodell entwickelt wurde. Hierbei geht es vor allem darum, dass vereinfachte kinematische Skelett, mit seinen im Vergleich zum Menschmodell geringen Anzahl an Freiheitsgraden, derart zu gestalten, dass sich damit ein komplexeres Menschmodell ohne merkliche Einschränkungen steuern lässt.

Die Arbeit soll im Folgenden beschreiben, wie ein auf ein digitales arbeitswissenschaftliches Menschmodell zugeschnittenes Graspable User Interface gestaltet werden kann und evaluieren, ob sich damit der Bedienaufwand von digitalen Menschmodellen bzw. der Ergonomiesimulation verringern lässt.

3 Entwicklung und Beschreibung eines Graspable User Interface für ein arbeitswissenschaftliches digitales Menschmodell

Im vorangegangenen Kapitel wurde festgestellt, dass bisher kein auf ein arbeitswissenschaftliches Menschmodell zugeschnittenes passives Eingabegerät existiert, mit dem dessen kinematische Kette manipuliert werden kann. In diesem Kapitel soll die Gestaltung und Entwicklung eines solchen Graspable User Interface beschrieben werden. In Anlehnung an das erste Eingabegerät seiner Art, dem *Dinosaur Input Device*, mit dem es möglich war Dinosaurier zu steuern (siehe 2.3.4), soll das in dieser Arbeit entwickelte Eingabegerät *Human Input Device* genannt werden. Dieses soll am Beispiel des digitalen Menschmodells *Jack* von *Siemens PLM* ein digitales, arbeitswissenschaftliches Menschmodell kontrollieren. Hierzu werden zunächst Vorbetrachtungen durchgeführt. Anschließend werden der Aufbau und die Entwicklung der Benutzungsschnittstelle beschrieben. Schließlich wird aufgezeigt, wie sich das Interface in den Produktionsplanungsprozess manueller Arbeitsplätze integrieren lässt.

3.1 Vorbetrachtungen

Als Basis für den Aufbau und die Entwicklung des Graspable User Interfaces für ein arbeitswissenschaftliches, digitales Menschmodell, wird zunächst eine Vorbetrachtung durchgeführt. In dieser werden zuerst das Konzept und die Anforderungen beschrieben, die an das Interface gestellt werden. Danach erfolgt eine Analyse des *Jack-Modells*, bei der der Betrachtungsschwerpunkt auf der kinematischen Kette zur Manipulation der Körperhaltung liegt.

3.1.1 Konzeptentwurf und Anforderungen

Hardwareseitig soll das Graspable User Interface eine menschenähnliche Puppe im verkleinerten Maßstab darstellen. Die Maße der Puppe sollen dem 50. Perzentil der deutschen Bevölkerung nach DIN 33402-2 entsprechen. Entgegen dem *Monkey*-Eingabegerät (siehe 2.3.4) soll mechanisch nicht nur ein Skelett eines Menschmodells abgebildet werden, sondern, ähnlich *Qumarion* (siehe 2.3.4), möglichst auch in der Form mit dem zu steuernden digitalen Menschmodell übereinstimmen. Hierbei soll die Eingabepuppe konstruktiv dahingehend ausgelegt werden, dass sie mit additiven Fertigungsverfahren hergestellt wird, sodass nur geringe Einschränkungen in der Formgebung vorliegen. Im Gegensatz zu *Qumarion*, das allgemein für Computeranimationsmodelle entwickelt wurde, soll es aber eigens auf ein

arbeitswissenschaftliches Modell zugeschnittenen werden. Hierzu wird das in der Praxis weit verbreitete (Mühlstedt, 2012) Menschmodell *Jack* von *Siemens PLM* ausgewählt, das in der Software *Process Simulate* in der Produktreihe *Tecnomatix* eingegliedert ist. Informelle Vorabtests mit einer Puppe im Maßstab 1:5 ergaben (Abbildung 3.1, links), dass die Bedienung der Puppe in dieser Größenordnung nicht zu groß ist, um diese am Computer-Arbeitsplatz zu bedienen und nicht zu klein, um die Körperhaltung praktikabel zu manipulieren. Eine Übersicht der Gelenke und Freiheitsgrade der Eingabepuppe zeigt Abbildung 3.1 auf der rechten Seite. In Summe soll das Menschmodell Jack mit 22 Freiheitsgraden derart gesteuert werden, dass die Körperhaltung der Eingabepuppe möglichst genau mit der Körperhaltung des *Jack-Modells* übereinstimmt. Die Anpassung des digitalen Menschmodells, in Abhängigkeit von der Eingabepuppe, soll dabei zyklisch ohne Betätigung eines speziellen Tasters oder ähnliches erfolgen, sodass der Benutzer über den Computer-Bildschirm direkt eine Rückmeldung erhält und ggf. die Position nachregeln kann. Die Rückmeldung darf dabei in einer gewissen, für den Benutzer spürbaren, Latenz erfolgen. Die Aktualisierungsrate sollte aber dennoch nicht etwa 1 Hz unterschreiten, um lange Bedienzeiten zu vermeiden. Die Anbindung des Eingabegeräts an den Computer soll hierbei über dessen USB-Anschluss erfolgen. Bei der Kontrolle des digitalen Menschmodells soll sich auf die Manipulation der Körperhaltung beschränkt werden, weshalb keine Hand-, Fuß- und Fingergelenke der Puppe vorgesehen sind. Ebenfalls ist keine Erfassung der globalen Position und Orientierung der Eingabepuppe im Raum vorgesehen, um das *Jack-Modell* entsprechend zu positionieren und auszurichten. Entsprechende Funktionen sollen weiterhin über die konventionellen Methoden in *Process Simulate* durchgeführt werden.

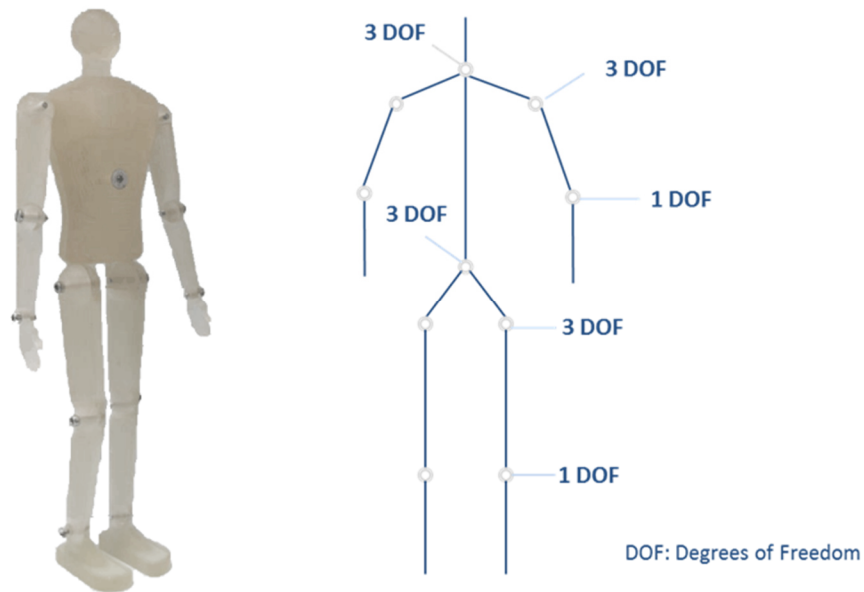


Abbildung 3.1: links: Puppe für Vorabtest, rechts: Übersicht Gelenke und Freiheitsgrade des Eingabegeräts (Wiegmann et al., 2017)

3.1.2 Analyse Jack

Damit das Menschmodell *Jack*, nach den unter 3.1.1 beschriebenen Aspekten, kontrolliert werden kann, ist eine Analyse seines Aufbaus notwendig. Der Fokus dieser Analyse liegt insbesondere in dessen kinematischer Kette bzw. dessen inneren Modells. Hierzu wurde der Teil der kinematischen Kette des Jack-Modells untersucht, der die Körperhaltung (ohne Hand- und Fußgelenk) repräsentiert. Basis bildet hierzu das 50. Perzentil der männlichen deutschen Bevölkerung, das von *Process Simulate* gebildet wurde. Der hierfür verantwortliche Teil des Skeletts mit 77 Freiheitsgraden konnte aus der segmentierten Version des *Jack-Modells* abgeleitet werden (siehe Abbildung 3.2). Ebenfalls konnte über den *Joint Jog*, der Funktion zur Anpassung der Körperhaltung über Vorwärtskinematik, von allen Gelenken, die keiner Gelenkgruppe angehören, der Minimal- und Maximalwinkel ermittelt werden.

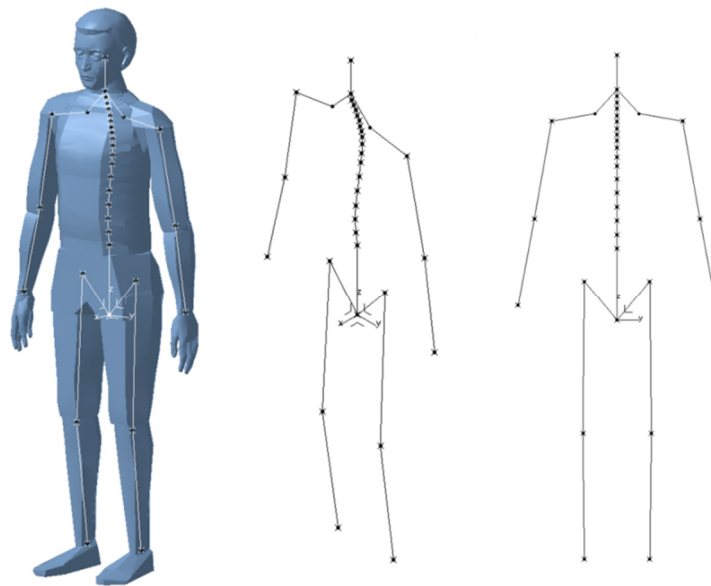


Abbildung 3.2: Skelett zur Steuerung der Körperhaltung des *Jack-Modells*

Welche Gelenke zu Gelenkgruppen im *Jack-Modell* zusammengefasst sind, konnte ebenfalls mithilfe des *Joint Jog* bestimmt werden. Das Menschmodell besitzt zwei Funktionsgruppen, die jeweils über drei Stellglieder adjustiert werden können – die Wirbelsäule und die Schulterbein-Schulter-Gruppe. Um den Zusammenhang zwischen Stellwert und den einzelnen Gelenkwinkeln der Gruppen zu ermitteln, wurde über die Programmierschnittstelle von *Process Simulate* ein Programm geschrieben, mit dem die Winkel der kinematischen Kette des *Jack-Modells* ermittelt werden können. Über den *Joint Jog* wurden die Stellwerte der kinematischen Kette schrittweise variiert und die einzelnen Winkel des *Jack-Modells* wurden dann erfasst.

Aufbau und Zusammenhänge der Wirbelsäule

Bezüglich der Wirbelsäulengruppe konnte dabei folgendes festgestellt werden: Alle Gelenke der Wirbelsäule besitzen je drei Freiheitsgrade. Über drei Stellwerte lässt sich die Wirbelsäule in die folgenden Richtungen bewegen (englische Bezeichnungen):

- Flexion
- Lateral
- Axial

Die Untersuchung der Beziehung zwischen Stellwert und den einzelnen Gelenkwinkeln ergab, dass pro Gelenk immer je ein Freiheitsgrad von genau einem Stellwert abhängig ist. Diese Zusammenhänge lassen sich annähernd durch Polynome beschreiben. Abbildung 3.3 zeigt dies am Beispiel eines Freiheitsgrades des Gelenkes *spine3t2* und dem Stellwert *f* für die Flexion

der Wirbelsäule. Dieses Beispiel lässt sich auf die übrigen Gelenke und Stellwerte der Wirbelsäule übertragen.

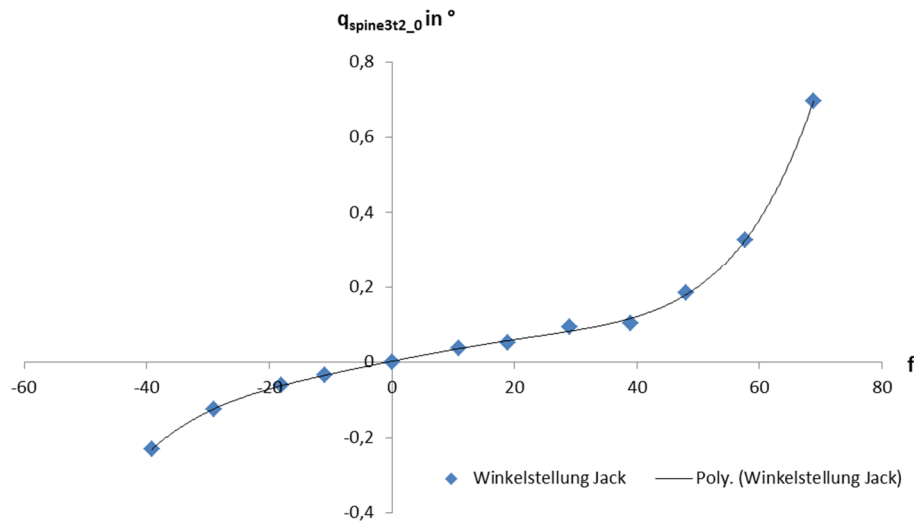


Abbildung 3.3: Zusammenhang zwischen dem Winkel q_{spine3t2_0} der Wirbelsäule und dem Stellwert f zur Flexion der Wirbelsäule

Aufbau und Zusammenhänge der Schulterbein-Schulter-Gruppe

Im Gegensatz zur Gelenkgruppe der Wirbelsäule verhält sich die Schulterbein-Schulter-Gruppe anders. Über den *Joint Jog* lassen sich für folgende Bewegungsrichtungen entsprechende Stellwerte einstellen:

- Abduction a
- Lateral humeral rotation l
- Transverse abduction t

Die Schulterbein-Schulter-Gruppe besteht aus zwei Gelenken: Dem Schulterbein-Gelenk mit zwei Freiheitsgraden und dem Schultergelenk mit drei Freiheitsgraden. Die kinematische Kette der Schulterbein-Schulter-Gruppe ist damit von folgenden Winkeln abhängig:

- q_{clavicle_0}
- q_{clavicle_1}
- q_{shoulder_0}
- q_{shoulder_1}
- q_{shoulder_2}

Es konnte zum einen ermittelt werden, dass der Winkel q_{clavicle_1} nur von vom Stellwert l abhängig ist und ein linearer Zusammenhang besteht (Abbildung 3.4).

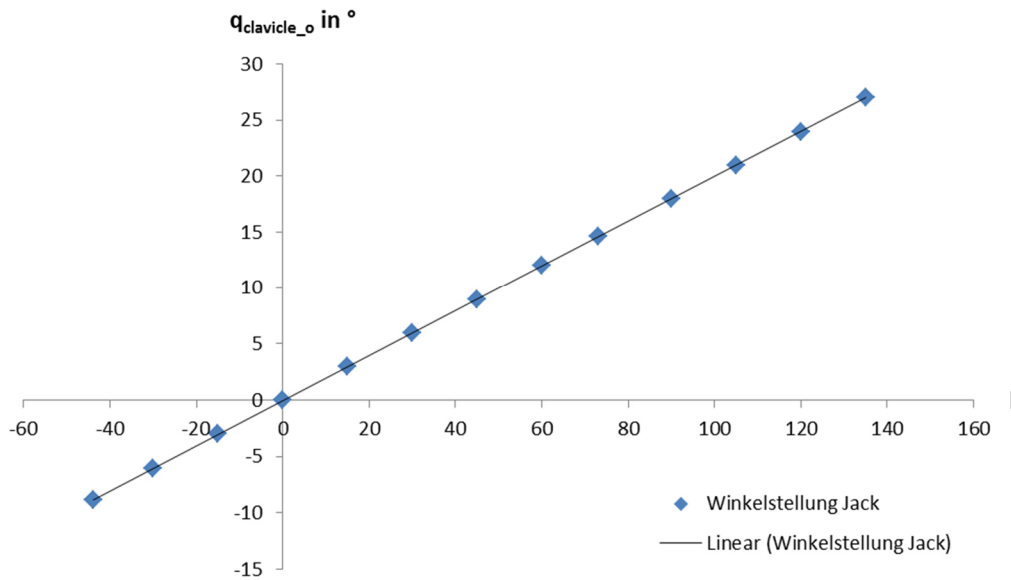


Abbildung 3.4: Zusammenhang zwischen dem Winkel $q_{clavicle_1}$ und dem Stellwert l der Schulterbein-Schulter-Gruppe

Im Gegensatz dazu sind die Winkel $q_{clavicle_0}$, $q_{shoulder_0}$ und $q_{shoulder_1}$ nicht nur von l , sondern auch von a abhängig. Abbildung 3.5 zeigt diesen Zusammenhang. Die Punkte stellen dabei die gemessene Winkelstellung am *Jack-Modell* und die Fläche ein dazugehöriges zweidimensionales Interpolationspolynom dritten Grades dar.

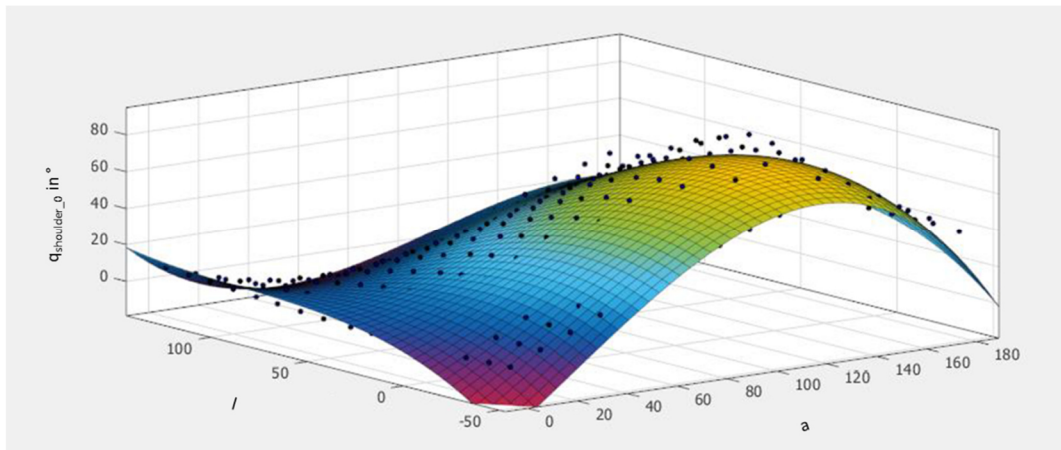


Abbildung 3.5: Zusammenhang zwischen dem Winkel $q_{shoulder_0}$ und den Stellwerten l und a der Schulterbein-Schulter-Gruppe

Das Gelenk $q_{shoulder2}$ ist demgegenüber von allen drei Stellgliedern abhängig. Zum einen analog zu den Winkeln $q_{clavicle_0}$, $q_{shoulder_0}$ und $q_{shoulder_1}$ von der Kombination aus l und a sowie unabhängig davon von t , sodass gilt:

$$q_{shoulder_2}(l, a, t) = f(l, a) + g(t)$$

Der Winkel $q_{\text{shoulder_2}}(t=0)$ ist in Abbildung 3.6 aufgezeigt. Dargestellt sind wieder die Messwerte und ein zweidimensionales Interpolationspolynom fünften Grades. Da $g(t)$ an der Stelle $t=0$ null ist, entspricht die Darstellung der Funktion $f(l,a)$.

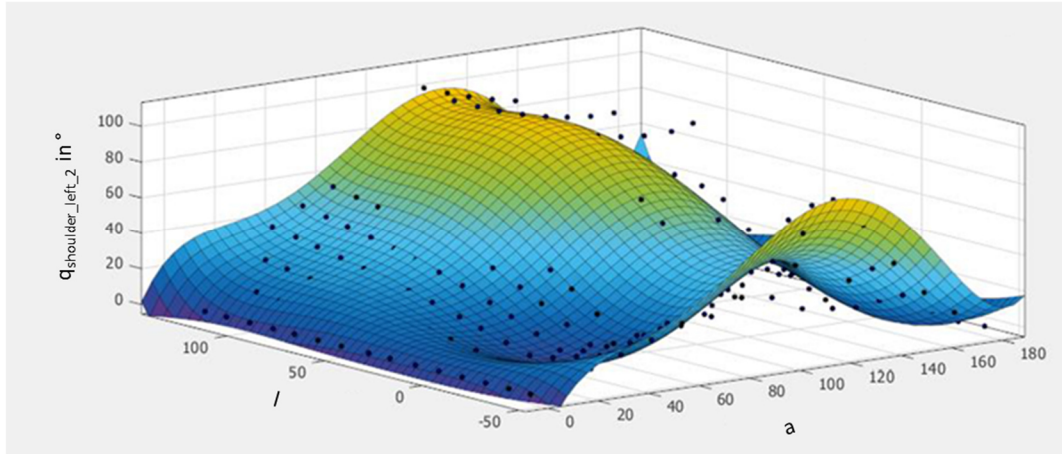


Abbildung 3.6: Zusammenhang zwischen dem Winkel $q_{\text{shoulder_2}}$ und den Stellwerten l und a der Schulterbei-Schulter-Gruppe bei $t = 0$

Korrespondierend hierzu zeigt Abbildung 3.7 den Winkel $q_{\text{shoulder_2}}(l=0,a=0,t)$. Da $f(l=0,a=0)$ null ergibt, ist diese Darstellung identisch zur Funktion $g(t)$. Ersichtlich ist, dass ein linearer Zusammenhang zwischen $g(t)$ und t besteht.

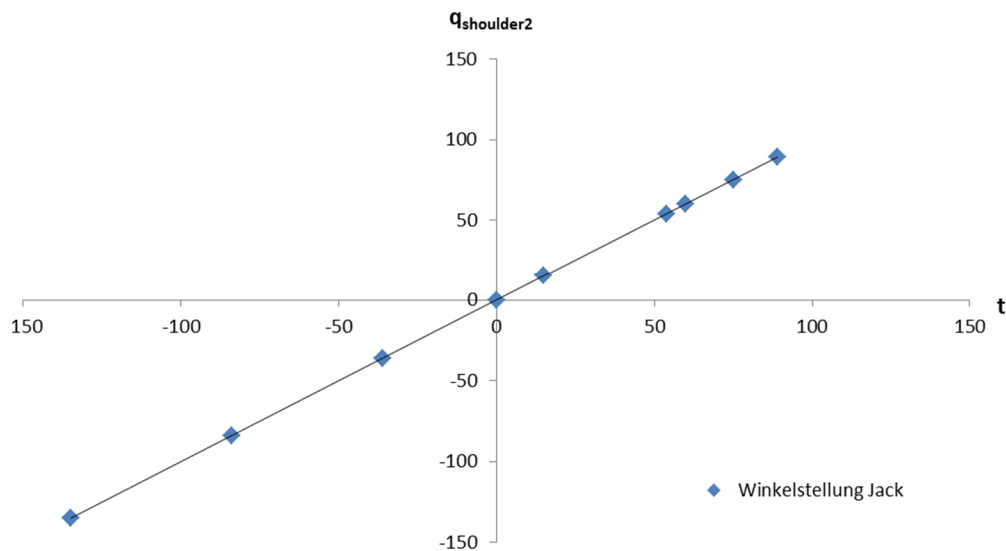


Abbildung 3.7: Zusammenhang zwischen dem Winkel $q_{\text{shoulder_2}}$ und dem Stellwert t der Schulterbei-Schulter-Gruppe bei $l = 0$ und $a = 0$

3.2 Aufbau und Entwicklung

Auf Basis der Vorbetrachtungen wird in diesem Unterabschnitt die Entwicklung des Graspable User Interfaces beschrieben. Hierbei wird zunächst erläutert, wie ein Skelett bzw. eine kinematische Kette für ein solches Interface in Form einer Eingabepuppe abgeleitet werden kann. Neben dem mechanischen Aufbau und der Konstruktion werden zudem die verwendete Sensorik und die Schnittstelle zu *Process Simulate* und dessen Menschmodell beschrieben. Darüber hinaus wird aufgezeigt, inwiefern die Puppe bedient wird, um damit die Körperhaltung des *Jack-Modells* zu ändern und wie daraus resultierend Bewegungen erzeugt werden können.

3.2.1 Ableitung Skelett

Als Basis für die mechanische Konstruktion wurde ein Skelett für das Eingabegerät vom Jack-Modell abgeleitet. Dieses Skelett beinhaltet zum einen die Gelenk-Rotationsachsen des zukünftigen Eingabegeräts und zum anderen deren Rotationsbereiche, repräsentiert durch Minimal- und Maximalwinkel. Für alle Winkel des *Jack-Modells*, die nicht Teil einer Gelenkgruppe und einem Gelenk der Eingabepuppe (siehe Abbildung 3.2 rechts) entsprechen, können die Rotationsachsen und -bereiche direkt skaliert übernommen werden. Dies ist für alle Gelenke außer derer, die der Wirbelsäule und der Schulterbein-Schulter-Gruppe angehören, der Fall. Diese beiden Gelenkgruppen sollen in der Puppe durch je ein Gelenk mit drei Freiheitsgraden ersetzt werden. Trotz dieser Vereinfachung soll allerdings nach wie vor gewährleistet werden, dass die Körperhaltung der Puppe mit der des *Jack-Modells* weitestgehend übereinstimmt. Die Vorgehensweise, durch die dies erreicht werden soll, ist in Abbildung 3.8 am Beispiel der Beugung (Flexion) der Wirbelsäule dargestellt. Die Gelenkpositionen der Wirbelsäule vom *Jack-Modell* werden für die drei Stellungen maximal nach vorne gebeugt ($f = 68$), aufrecht ($f = 0$) und maximal nach hinten gebeugt ($f = -39$) ermittelt. Die Verbindungslinien der letzten beiden Gelenke der Wirbelsäule werden verlängert und bilden ein Dreieck. Die Gelenkachse befindet sich dann im Flächenschwerpunkt dieses Dreiecks und orthogonal zur Ebene, in der dieses Dreieck liegt. Die Rotationsachse hätte auch in den Schnittpunkt der Verlängerungen aus maximal nach vorne und hinten gebeugter Wirbelsäule gelegt werden können. Hierdurch würde es allerdings dazu kommen, dass es eine höhere Abweichung zwischen Eingabepuppe und *Jack-Modell* bei aufrechter Haltung kommt, die das Menschmodell allerdings häufig einnehmen soll. In den extremen Stellungen, die eher die Ausnahme darstellen, würden die Haltungen von Eingabepuppe und das *Jack-Modell* stark übereinstimmen. Durch die Festlegung der Lage der

Rotationsachse in den Flächenschwerpunkt soll dieser Effekt ausbalanciert werden. Bei den übrigen Freiheitsgraden der Wirbelsäule wurde analog hierzu vorgegangen.

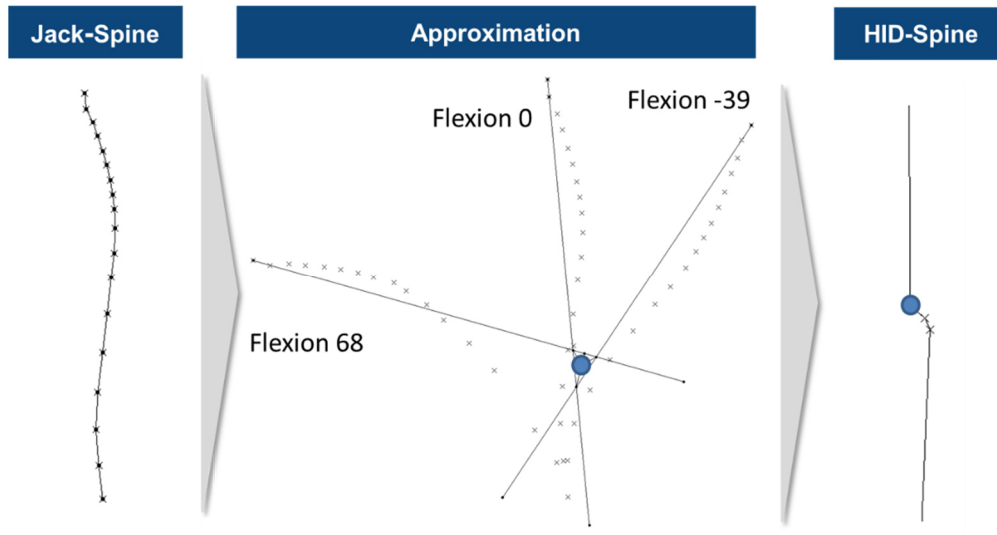


Abbildung 3.8: Ermittlung der Gelenkachse für die Beugung (Flexion) der Wirbelsäule

Bei der Ermittlung der Gelenkachsen der Schultergelenke wurde ebenso verfahren. Die Ermittlung der Rotationsachse für das Anheben des Armes (Abduction) soll hierzu exemplarisch aufgezeigt werden (Abbildung 3.9). Hierbei wurden die Stellungen minimal, halb und ganz angehoben berücksichtigt.

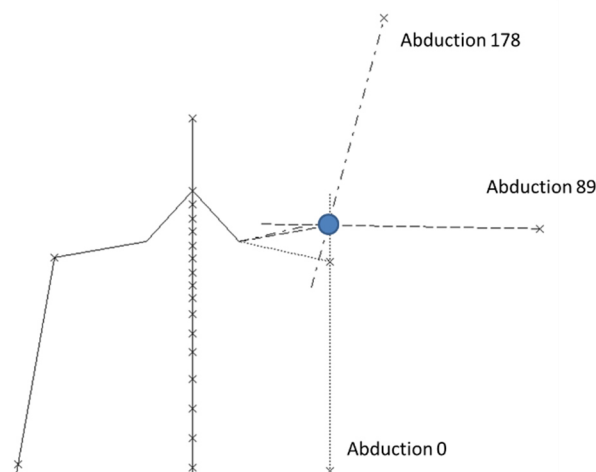


Abbildung 3.9: Ermittlung der Gelenkachse für das Anheben (Abduction) des Armes

Letztlich wird das resultierende Gesamtskelett der Puppe im Vergleich *Jack-Modell* in der folgenden Abbildung dargestellt.

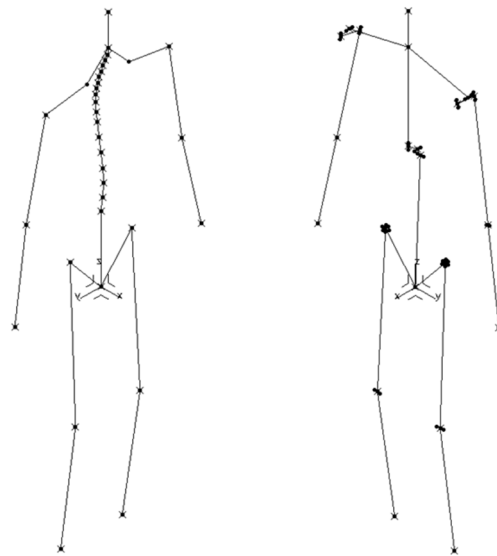


Abbildung 3.10: Skelett des *Jack-Modells* (links) im Vergleich zum Skelett der Eingabepuppe (rechts)

3.2.2 Auswahl Sensorik

Eine Kernfunktion der Eingabepuppe nehmen die Sensoren ein, mit denen die Körperhaltung erfasst wird. Vom Prinzip her handelt es sich bei dem System zur Erfassung der Körperhaltung um ein Motion-Capturing-System, wie es auch zur Bewegungserfassung am menschlichen Körper eingesetzt wird (siehe 2.2.4). Genau wie diese Systeme lassen sich auch die Motion-Tracking-Verfahren der Eingabepuppe in optische, elektromagnetische, elektromechanische und trägheitsbasierte Sensoren unterteilen. In den ähnlichen Arbeiten unter 2.3.4, in denen mithilfe von Graspable User Interfaces kinematische Ketten digitaler Modelle kontrolliert wurden, sind, bis auf trägheitsbasierte Systeme, alle Verfahren vertreten. Von den neun aufgezeigten Eingabegeräten basierten dabei sechs auf elektromechanischen, zwei auf optischen und eins auf elektromagnetischen Verfahren. Der Vorteil von elektromechanischen Systemen gegenüber den übrigen Systemen ist die geringe Störanfälligkeit, was höchstwahrscheinlich dazu führte, dass die meisten Eingabegeräte auf diesem Prinzip beruhen. Die potenziell höhere Störanfälligkeit der übrigen Systeme lässt sich auf dieselben Effekte zurückführen, wie sie auch bei Motion-Capturing von menschlichen Körperhaltungen vorherrschen können. Bei optischen Systemen kann es zu verdeckten Markern bzw. Körperteilen kommen, Verzerrungen magnetischer Felder führen bei elektromagnetischen Verfahren zu Fehlern und bei trägheitsbasierten Systemen kann ein mit der Zeit anwachsender Winkelfehler zu Problemen führen. Aus diesen Gründen soll das Tracking-System der Eingabepuppe ebenfalls elektromechanisch aufgebaut werden.

Mögliche verwendbare Sensoren stellen hierbei Potentiometer oder Drehgeber dar. Aufgrund der hohen Robustheit und der geringen Größe wurde als Sensor für die Messung der Gelenkwinkel ein optischer, inkrementeller Drehgeber der Fa. *Pewatron* (Modellfamilie 7S) ausgewählt. Der Sensor ist in Abbildung 3.11 dargestellt. Über einen Open-Collector-Ausgang werden diskrete Winkeländerungen der Ausgangswelle übertragen. Einen Winkel erhält man, wenn man das Bitmuster der um 90° phasenverschobenen Signale A und B auswertet. In der Abbildung sind diese Signale für eine Drehung der Welle mit konstanter Winkelgeschwindigkeit dargestellt. Werden alle Bitmusterkombinationen einmal durchlaufen, wurde die Welle um 0,9° gedreht. Die Drehrichtung lässt sich aus dem Verlauf des Bitmusters ermitteln. Da sich über diese beiden Signale lediglich eine Winkeländerung bestimmen lässt, wird zusätzlich ein Index-Signal (Signal Z) übersendet. Dieser einzelne Impuls gibt die Nullstellung der Sensorwelle. Letztlich wird der Winkel dadurch bestimmt, dass ausgehend von dieser Nullstellung die Winkeländerungen, die aus den Signalen A und B hervorgehen, aufsummiert werden.

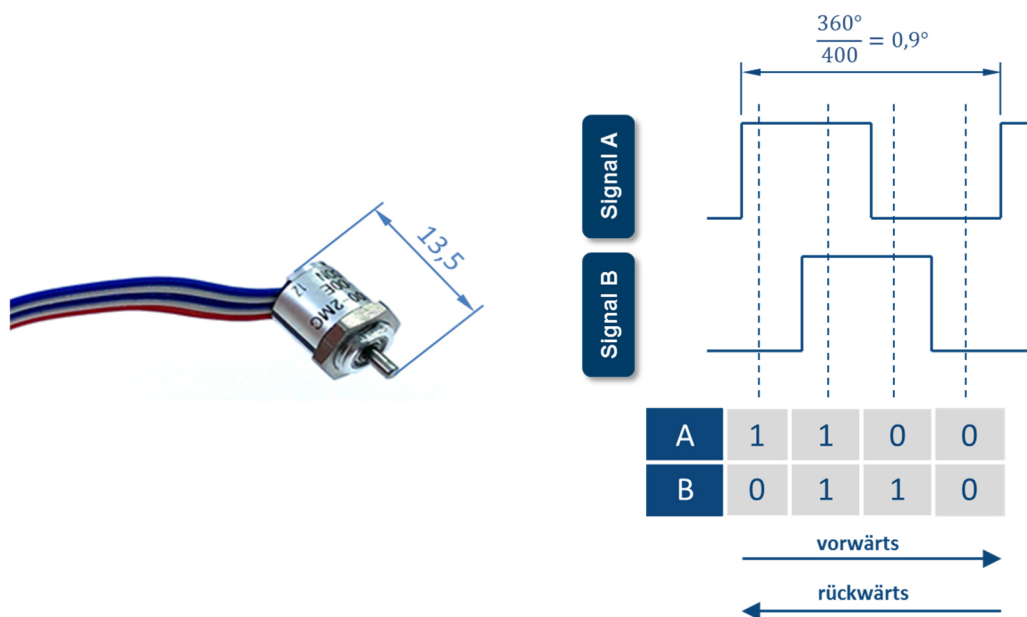


Abbildung 3.11: Darstellung Drehgeber und Dekodierung des Winkels aus dessen Signalen.

3.2.3 Mechanische Gestaltung und Konstruktion

Basierend auf dem ausgewählten Drehgeber wurde ein Gelenklager entwickelt, das in jedes Gelenk der Eingabepuppe integriert wird. Das Gelenk integriert den Drehgeber und soll zum einen die Kräfte und Momente aufnehmen, sodass die Sensorwelle lastfrei bleibt. Zum anderen soll über das Lager ein einstellbares Reibmoment aufgebaut werden, damit die einzelnen Gliedmaßen nach der Betätigung in deren Stellungen verbleiben. Den Aufbau des

Gelenks zeigt Abbildung 3.12 über die Montagereihenfolge und in der Schnittdarstellung. Es besteht aus einer festen Seite, die in das Eltern-Teil des Gelenkpaars eingebaut wird und einer zweigeteilten, drehbaren Seite, die mit dem Kind-Teil verbunden wird. Hierzu sind beide Seiten mit Gewindebohrungen und Schlüsselweiten versehen. Der Sensor wird durch eine Öffnung in das feste Teil gesteckt und mit einer Mutter verschraubt (1. Montageschritt). Das feste Teil besitzt einen Zapfen, der mit einer umlaufenden Nut versehen ist. Anschließend wird das erste Teil der drehbaren Seite über diesen Zapfen gesteckt (Montageschritt 2.). Dabei greift eine innenseitige Feder der drehbaren Seite in die Nut des Zapfens. Hierdurch sind beide Teile in axialer Richtung zueinander gesichert. Im nächsten Schritt wird die Welle des Sensors kraftschlüssig über einen Klemmbügel mit der drehbaren Seite verbunden (Montageschritt 3). Daraufhin wird das zweite Teil der drehbaren Seite ebenfalls auf den Zapfen gesetzt. Dessen innenseitige Feder greift ebenso in die umlaufende Nut des Zapfens. Über zwei Einstellschrauben werden dann die beiden Teile der drehbaren Seite mit dem Zapfen der festen Seite miteinander verspannt. Somit kann über die Vorspannkraft der Einstellschrauben das Reibmoment des Gelenks eingestellt werden.

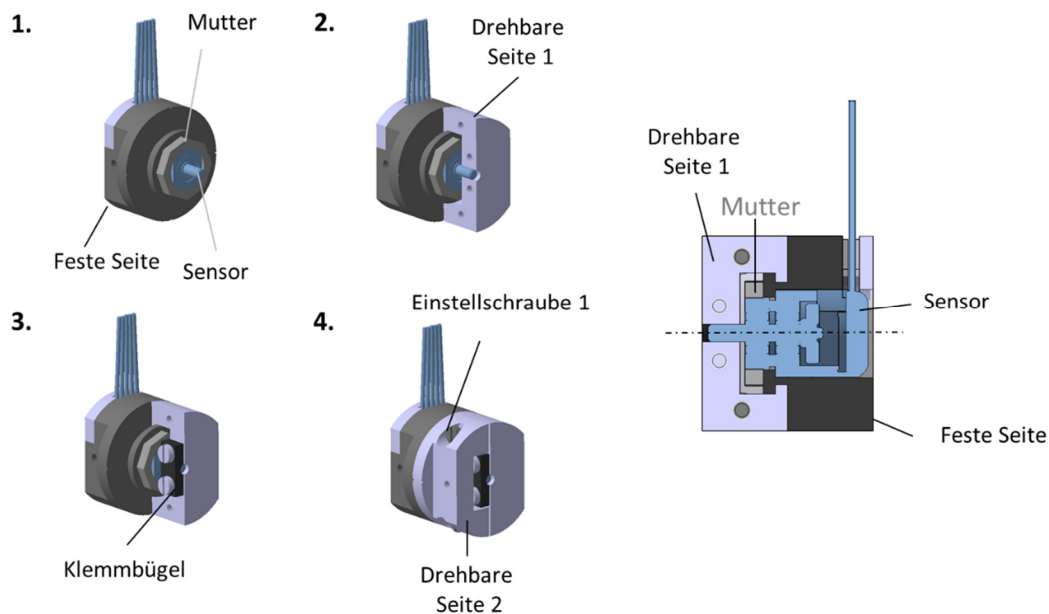


Abbildung 3.12: Montagereihenfolge und Schnittdarstellung (Wiegmann et al., 2017) des Gelenklagers.

Die Gelenklager werden aus Messing gefertigt und sind für die Fertigung mit konventionellen Fertigungsverfahren ausgelegt (Drehen und Fräsen). Sie sollen den Großteil der notwendigen, mechanischen Funktionen des Eingabegeräts übernehmen. Die übrigen hauptsächlich formgebenden Teile werden für die Herstellung mit additiven Fertigungsverfahren („3D-Druck“) vorgesehen. Bei der Gestaltung der Form wurde diese, soweit wie möglich, an die Form des *Jack-Modells* angeglichen. Abbildung 3.13 zeigt links exemplarisch, wie ein Gelenk

mit einem Freiheitsgrad aussieht. Eltern- und Kind-Teil sind um die Rotationsachse außen zylindrisch ausgeführt. Im Inneren ist dort das Gelenklager eingesetzt, das von außen mit den Formteilen verschraubt wird. Ebenfalls ist ersichtlich, dass die Formteile, angrenzend an die Gelenkachse, ausgespart wurden und somit dort, von der Form, her vom *Jack-Modell* abweichen. Dies ist notwendig, damit die Gelenke der Puppe sich im selben Winkelbereich wie die des Jack-Modells bewegen können. Denn im Gegensatz zum *Jack-Modell* ist es dem Eingabegerät nicht möglich, sich selbst zu schneiden oder die Form elastisch zu ändern.

Bauartbedingt ist es mit dem ausgewählten Sensor lediglich möglich, den Winkel eines Freiheitsgrades über dessen Welle zu erfassen. Gelenke mit drei Freiheitsgraden müssen deshalb durch drei seriell verschaltete Gelenke mit je einem Freiheitsgrad ersetzt werden. In Abbildung 3.13 ist dies auf der rechten Seite am Beispiel der Hüfte dargestellt. Statisch lassen sich dadurch alle Gelenkstellungen valide einstellen und auf das Menschmodell übertragen. Die Aufnahme und direkte Übertragung valider Bewegungen der Puppe ist dadurch allerdings praktisch nicht möglich, da die Puppe mit der Hand bedient werden muss und valide Bewegungen häufig ein gleichzeitiges Bewegen mehrerer Gelenke erfordern würde.

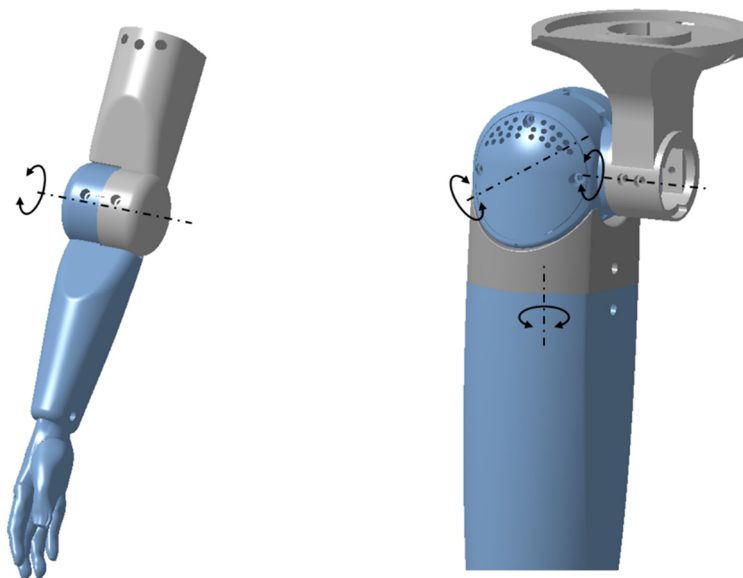


Abbildung 3.13: links: Gelenk mit einem Freiheitsgrad am Beispiel des Ellbogengelenks, rechts: Gelenk mit drei Freiheitsgraden am Beispiel des Hüftgelenks

Die gesamte Konstruktion des Eingabegerätes ist, im Vergleich zum *Jack-Modell*, in der folgenden Abbildung dargestellt:

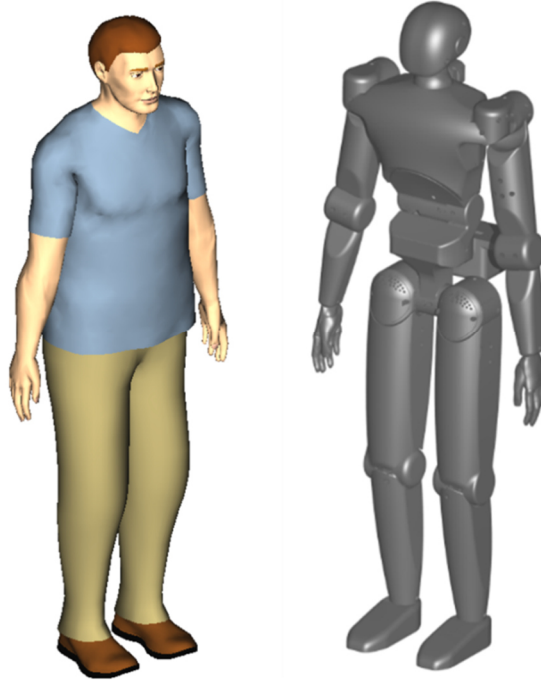


Abbildung 3.14: *Jack-Modell* im Vergleich zur Eingabepuppe (Wiegmann et al., 2017).

3.2.4 Beschreibung der Schnittstelle

Aufgabe der Schnittstelle ist es, die Sensorsignale zu erfassen, in Winkelgrößen umzuwandeln, an den Computer zu übertragen und dort die Körperhaltung des *Jack-Modells* zu ändern.

Die Erfassung und Umwandlung der Drehgeber-Signale erfolgt über Mikrocontroller vom Typ *ATmega168*. Dabei wertet je ein Mikrocontroller auf einer eigens dazu entwickelten Platine (Abmaße: 15 mm x 20 mm) die Signale eines Sensors aus. Diese Platinen werden in die einzelnen Körperteile der Eingabegeräte integriert. Der Schaltplan ist in der folgenden Abbildung dargestellt:

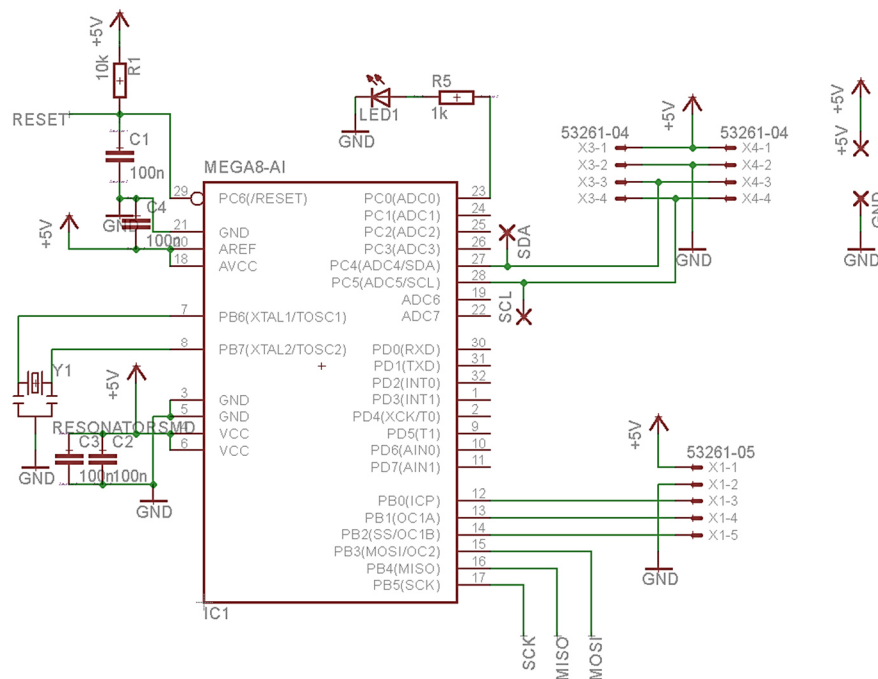


Abbildung 3.15: Schaltplan für Platine zur Auswertung und Weitergabe der Sensorwinkel

Der Sensor wird über die Steckerbuchse 53261-05 an die Platine angeschlossen. Die Mikrocontroller sind als Slave-Teilnehmer an einen I^2C -Bus angeschlossen. Jede Platine besitzt zwei Steckerbuchsen als Ein- und Ausgang für die beiden Bus-Leitungen und die Spannungsversorgung. Für den Mikrocontroller wurde ein Programm geschrieben, das zyklisch die Sensordaten einliest und in einen Winkel umwandelt. Wird es über den I^2C -Master angesprochen, so sendet es ihm den aktuellen Winkel zu.

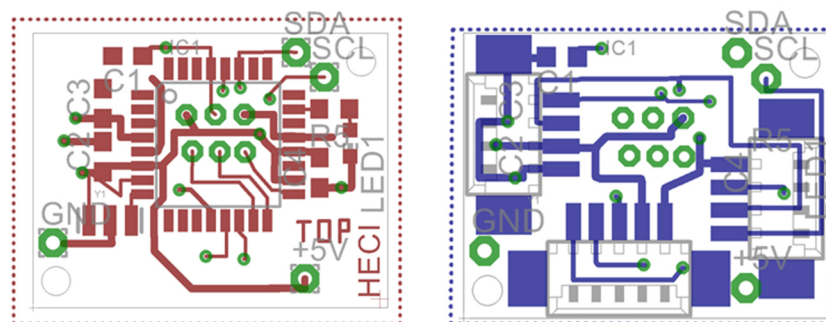


Abbildung 3.16: Ansicht von oben (links) und von unten (rechts) der Platine.

Der I^2C -Master ist ebenfalls vom Typ *ATmega168* und ist auf einer Platine integriert, die in einer Controller-Box außerhalb der Eingabepuppe eingebaut ist. Den Platinen-Schaltplan zeigt Abbildung 3.17.

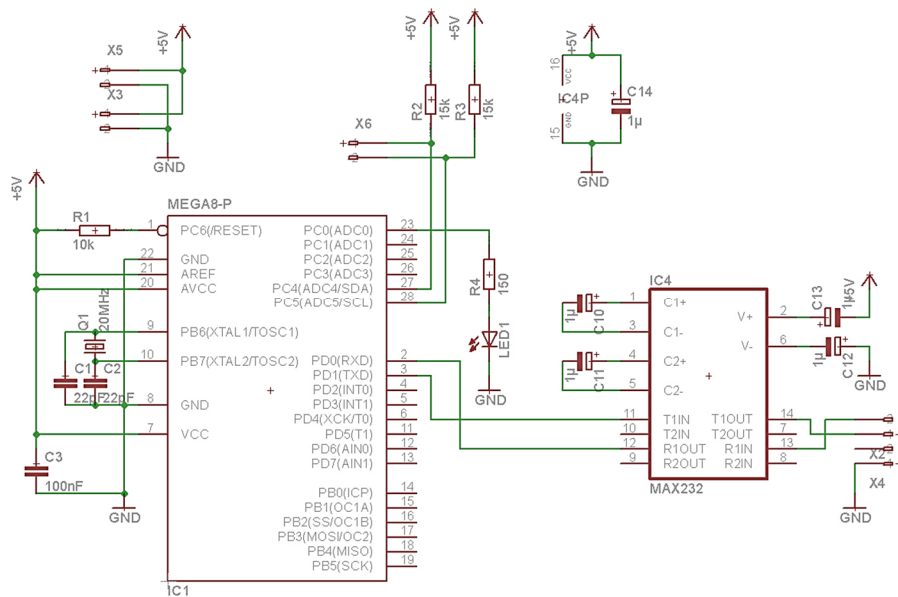


Abbildung 3.17: Schaltplan für Platine zur Auswertung und Weitergabe der Sensorwinkel

Über die Klemmen *X6* ist die Platine am I^2C -Bus angebunden. Der Master-Mikrocontroller fragt zyklisch die aktuellen Winkel aller Bus-Teilnehmer ab und kommuniziert dann über *UART* und einem Pegelwandler (*MAX232*) zu einem USB-Stick mit integriertem Konverter der Fa. *FTDI*. Dieser wird in die USB-Buchse des Computers gesteckt, auf dem die Software *Process Simulate* installiert ist. Das dazugehörige Platinenlayout ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

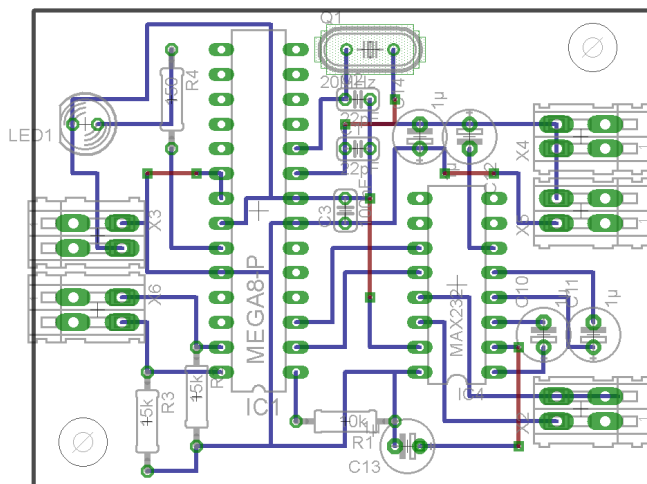


Abbildung 3.18: Layout Platine mit Master-Mikrocontroller

Die Software *Process Simulate* besitzt eine .NET-basierte Programmierschnittstelle. Im Folgenden soll in Grundzügen aufgezeigt werden, wie das Programm aufgebaut ist, das die Eingabewerte über die USB-Schnittstelle einliest und daraus resultierend die Körperhaltung

des *Jack-Modells* anpasst. Das Programm besitzt neben der Anpassung der Körperhaltung noch weitere, ergänzende Funktionen. Bei der folgenden Beschreibung des Programmaufbaus liegt der Fokus allerdings auf der Hauptfunktion. Die einzelnen ergänzenden Funktionen werden in 3.2.5 erwähnt.

Externe Anwendungen können über .NET-Klassenbibliotheken in das Programm eingebunden werden. In der für die Eingabepuppe erstellten Klassenbibliothek wurde zunächst die Klasse *HID* definiert. Einen Auszug über die Member der Klasse zeigt Abbildung 3.19. Über das Feld *ftdi* vom Typ *FTDI*, der über eine Bibliothek vom gleichnamigen Hersteller bezogen wird, können über den USB-Port die Winkel des Eingabegeräts eingelesen werden. Das Feld *hidJoints* stellt ein Array mit den Datentypen *HIDJoint* (siehe Abbildung 3.19) und der Länge 22 dar, das die Gelenke der Eingabepuppe repräsentiert. Jedes Gelenk besitzt einen Namen, einen Wert (*Value*), einen Offset-Wert (*OffsetValue*) und einen Status (*JointStatus*). Der Wert stellt dabei den dekodierten Sensorwert dar. Der Offset-Wert korrigiert die willkürliche Einbaulage des Sensors um die Drehachse des Gelenks. Der Status stellt eine Enumeration dar und kann folgende Werte annehmen:

- *NotReferenced*: Der Referenzpunkt des Drehgebers wurde noch nicht angefahren
- *Error*: Die Kommunikation des Master-Mikrocontrollers zum entsprechenden Slave-Teilnehmer ist fehlgeschlagen
- *ValueOffseted*: Die willkürliche Einbaulage des Drehgebers um die Rotationsachse wurde korrigiert
- *UnknownStatus*: Der Status des Winkels konnte nicht ermittelt werden

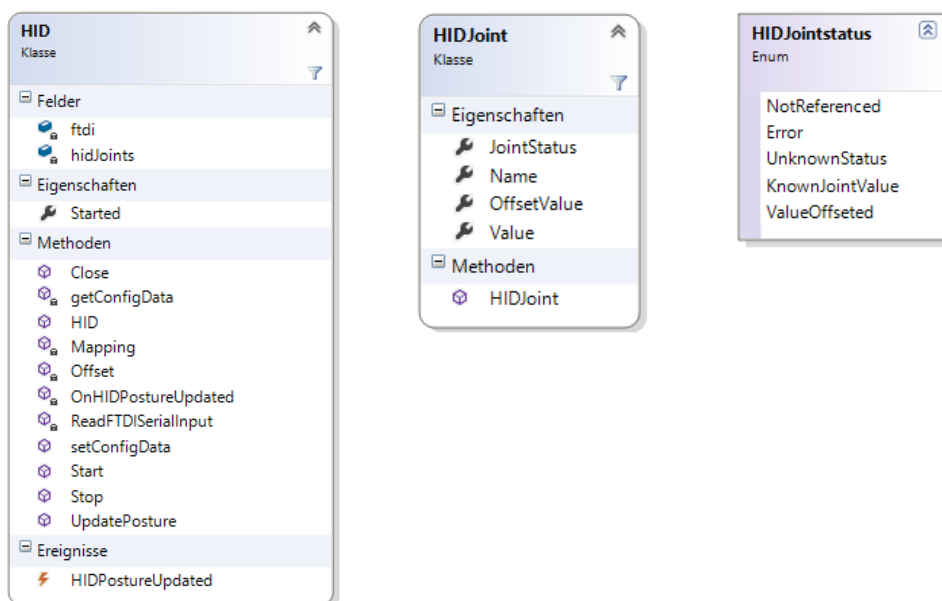


Abbildung 3.19: Member der Klasse *HID* und *HIDJoint* sowie Beschreibung der Enum *HIDJointstatus*

Wird die Methode *Start* aufgerufen, ruft diese zyklisch die Methode *UpdatePosture* auf, bis die Methode *Stop* aufgerufen wird. Den Ablauf der Methode zeigt Abbildung 3.20 auf der linken Seite. Zunächst werden über die Instanz der Klasse *FTDI* über dessen Methode *Read* die Winkel der Eingabepuppe eingelesen. Anschließend wird daraus resultierend jeder entsprechenden Komponente von *hidJoint* der Wert (*Value*) zugewiesen. Über die Methode *Offset* werden diese dann korrigiert. Daraufhin wird aus diesen Gelenkwinkeln über die Methode *Mapping* die Pose für das *Jack-Modell* erzeugt. Diese wird über den Datentyp *TxHumanPosture* aus dem Namensraum *Tecnomatix.Engineering* beschrieben. In der Methode *Mapping* werden die insgesamt 77, für die Körperhaltung des *Jack-Modells* relevanten Winkel, in Abhängigkeit der *hidJoints* berechnet und einer Instanz der Klasse *TxHumanPosture* zugeordnet. Dabei werden die Werte der Gelenke, die zu keiner Gelenkgruppe gehören, direkt dem dazugehörigen Gelenkwinkeln der Eingabepuppe zugewiesen. Weist beispielsweise das Ellenbogengelenk der Eingabepuppe den Winkel 90° auf, so wird dem Ellenbogengelenk der *TxHumanPosture* ebenfalls der Winkel 90° zugewiesen. Die Winkel, die zur Gelenkgruppe der Wirbelsäule gehören, werden gemäß der Interpolationspolynome berechnet (siehe 3.1.2). Die zweidimensionalen Interpolationspolynome der Schulterbein-Schulter-Gruppe wiesen zu hohe Abweichungen auf. Aus diesem Grund wurden dort, anstelle der Interpolationspolynome, diskretisierte Flächen aus den Messungen am *Jack-Modell* verwendet. Die Methode *OnPostureUpdated* löst anschließend das Ereignis *HIDPostureUpdated* aus, das schließlich die aktuelle *TxHumanPosture* bereitstellt, mit der die neue Körperhaltung des *Jack-Modells* beschrieben werden kann.

In der Klassenbibliothek wurde ebenfalls eine Klasse definiert, die von der Klasse *TxButtonCommand* erbt. Der Typ *TxButtonCommand* gehört dem *Tecnomatix.Engineering* Namespace an, über den die *Process-Simulate*-spezifischen Datentypen verwendet werden können. Über diesen Typ können eigene Befehle in *Process Simulate* erstellt und eingebunden werden. In der Klasse müssen dazu mithilfe des *override*-Modifizierers von der Basisklasse geerbte Member überschrieben werden. Dies betrifft auch die Methode *Execute*, die ausgeführt wird, wenn der Anwender über die graphische Benutzungsschnittstelle von *Process Simulate* den Befehl ausführt. Eine Übersicht über die definierte Klasse *HIDCmd*, die den Befehl einbindet, ist in Abbildung 3.20 dargestellt.

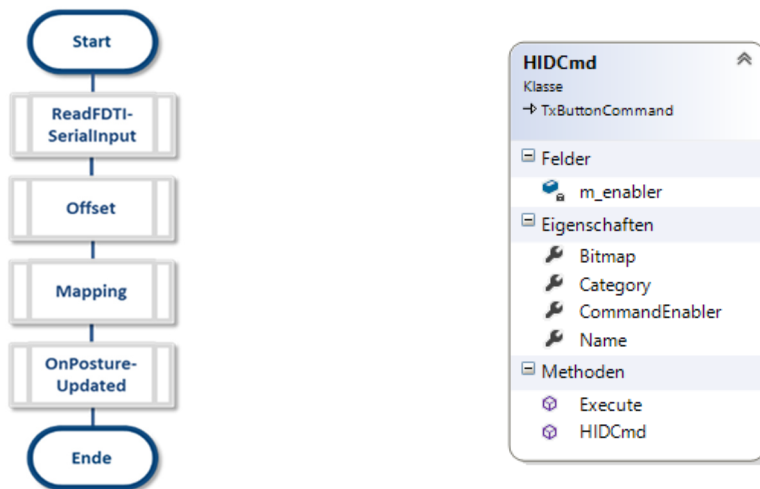


Abbildung 3.20: Ablauf der Methode *UpdatePosture* (links) und Beschreibung der Klasse *HIDCmd* (rechts)

Die Methode *Execute* ruft anschließend die graphische Benutzungsschnittstelle auf, die in Unterabschnitt 3.2.5 beschrieben ist. Dort wird eine Instanz der Klasse *HID* erzeugt. Über dessen Ereignis *HIDPostureUpdated* wird dem Menschmodell Jack, das über den Typ *TxHuman* des Namespace *Tecnomatix.Engineering* beschrieben wird, die Körperhaltung angepasst. Dies geschieht über dessen Methode *SetPosture*. Das dazu benötigte Argument vom Typ *TxHumanPosture* wird über das Ereignis-Argument bereitgestellt.

3.2.5 Bedienung und Funktion

Die Eingabepuppe ist an einem Stativ montiert. Über dieses wird sie neben dem Computerbildschirm positioniert, auf dem die Software *Process Simulate* gestartet wird (Abbildung 3.21).

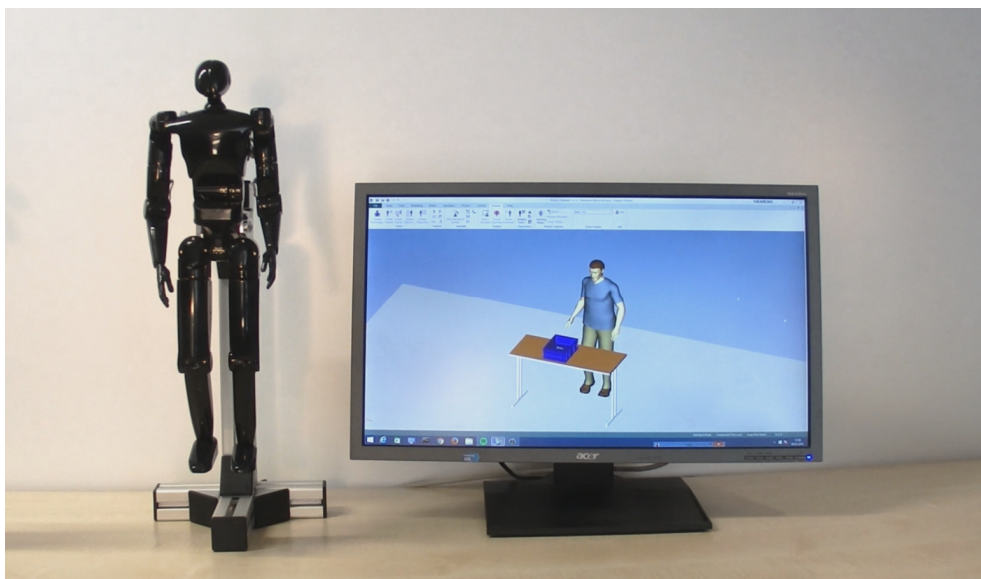


Abbildung 3.21: Einsatz der Eingabepuppe mit Stativ am Computer-Arbeitsplatz

Um ein Menschmodell zu kontrollieren, wird dieses ausgewählt. Dadurch wird der zuvor beschriebene *HID-Button* auswählbar. Wird er betätigt, erscheint die graphische Benutzungsschnittstelle des Plugins (siehe Abbildung 3.22). Nachdem der *Start-Button* geklickt wird, erscheint auf dem Bild der Puppe für jedes Gelenk ein Label, das den Status des Gelenks verdeutlicht. Wurde ein Gelenk noch nicht referenziert, erscheint dieses in gelber Farbe. Der Benutzer ist dann aufgefordert, das Gelenk zu bewegen, sodass der Referenzpunkt des Gelenks angefahren wird. Ist dies geschehen, so nimmt das Label eine grüne Farbe an und die Gelenkstellung wird auf das Jack-Modell übertragen, sodass es diese Stellung einnimmt. Das Label wird rot, sofern ein Fehler bei der Kommunikation mit dem dazugehörigen Mikrocontroller auftritt. Sobald alle Gelenke referenziert sind, werden die Labels ausgeblendet.

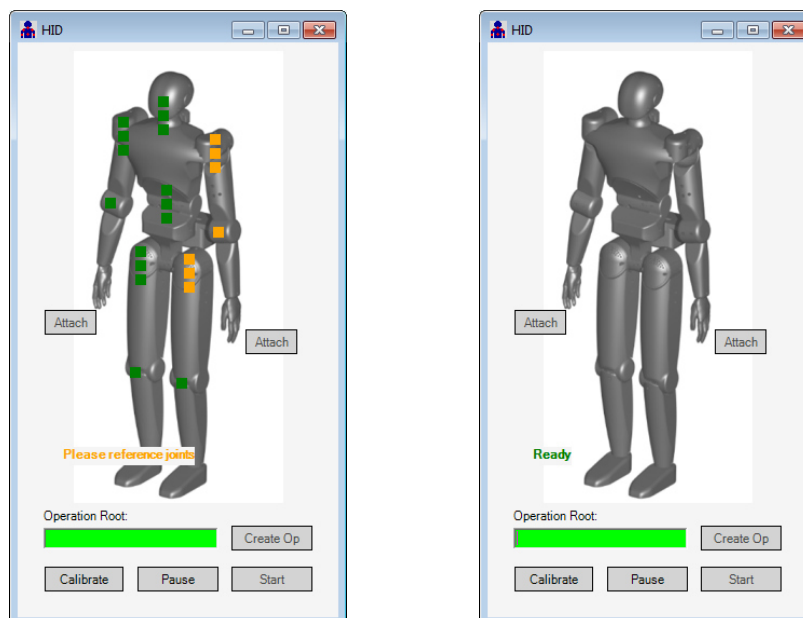


Abbildung 3.22: Grafische Benutzungsschnittstelle des Plugins, links: Gelenke teilweise referenziert, rechts: Gelenk vollständig referenziert

Der Bediener kann nun das *Jack-Modell* über das Eingabegerät in die gewünschte Körperhaltung manipulieren. Dabei ist eine Bedienung mit beiden Händen vorteilhaft. Mit einer Hand wird ein Elternteil in der kinematischen Kette fixiert und mit der anderen Hand wird ein Kind-Teil bewegt, sodass der gewünschte Winkel zwischen den Teilen eingestellt wird. Abbildung 3.23 zeigt, wie die Eingabepuppe bedient wird und das dazugehörige *Jack-Modell*, dessen Körperhaltung sich der Körperhaltung der Puppe annähert. Aus der visuellen Rückmeldung über den Computerbildschirm wird die daraus resultierende Abweichung zur Zielpose durch den Benutzer korrigiert.

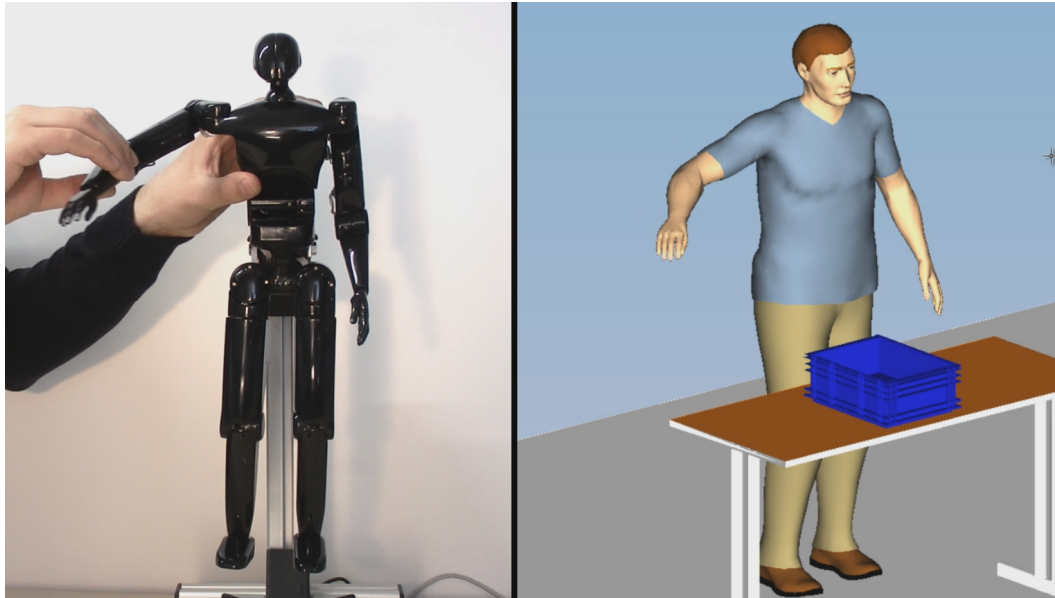


Abbildung 3.23: Bedienung der Eingabepuppe und korrespondierendes *Jack-Modell* (Wiegmann et al., 2017)

Das Einstellen und Korrigieren der Körperhaltung kann durch einen vereinfachten Regelkreis beschrieben werden (Abbildung 3.24). Ausgangspunkt ist eine Zielpose, die das *Jack-Modell* einnehmen soll. Der Bediener, der den Regler in diesem Regelkreis darstellt, bedient die Puppe. Daraus resultiert eine Pose bzw. Körperhaltung der Eingabepuppe. Über dessen Gelenkwinkel erfolgt das Mapping auf das *Jack-Modell*, sodass dieses dadurch eine angenäherte Pose einnimmt. Der Benutzer erfasst nun diese Pose über den Computer-Bildschirm und bestimmt die Abweichung zur Zielpose. Aus dieser Abweichung ändert er die Pose der Eingabepuppe und korrigiert damit die Haltung des *Jack-Modells*. Dies geschieht solange, bis der Benutzer mit der Pose des *Jack-Modells* zufrieden ist.

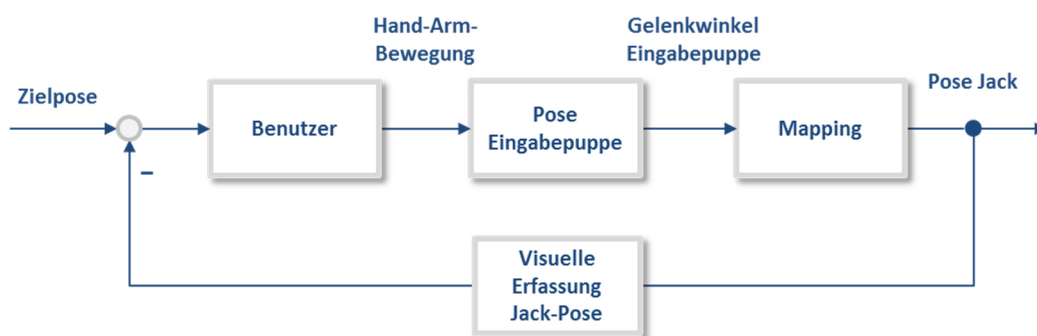


Abbildung 3.24: Vereinfachtes Regelkreis-Modell für die Einstellung der Körperhaltung des *Jack-Modells* mit der Eingabepuppe

Ist der Benutzer mit der Pose des *Jack-Modells* zufrieden, kann er die Anwendung beenden und mit den konventionellen Tools in *Process Simulate* fortfahren und z.B. die Körperhaltung analysieren. Im Plugin selbst lassen sich darüber hinaus Operationen anlegen,

aus denen über den Keyframe-Ansatz Bewegungen des Menschmodells erzeugt werden. Hierzu muss der Benutzer einen Pfad festlegen, indem die Operationen bzw. Keyframes gespeichert und zu einer Bewegung zusammengefasst werden. Ist dies erfolgt, bringt er über die Eingabepuppe das Jack-Modell in die gewünschten Posen und speichert diese dann über den Button *Create Op.* ab. Über den *Simulation Player* wird dann eine Bewegung aus den einzelnen Posen erzeugt, indem die Gelenkwinkel zwischen den Posen über die Zeit linear interpoliert werden (siehe 2.2.4). Soll während der Einstellung der Pose zusätzlich die globale Position und Orientierung des Menschmodells geändert werden, kann dies wie sonst in *Process Simulate* auch üblich über dessen Funktion *Placement Manipulator* erfolgen (Abbildung 3.25). Hierbei kann das *Jack-Modell* über ein eingeblendetes Achssystem verschoben bzw. gedreht werden, indem man mit der Maus die einzelnen Achsen bzw. Bögen festhält und zieht.

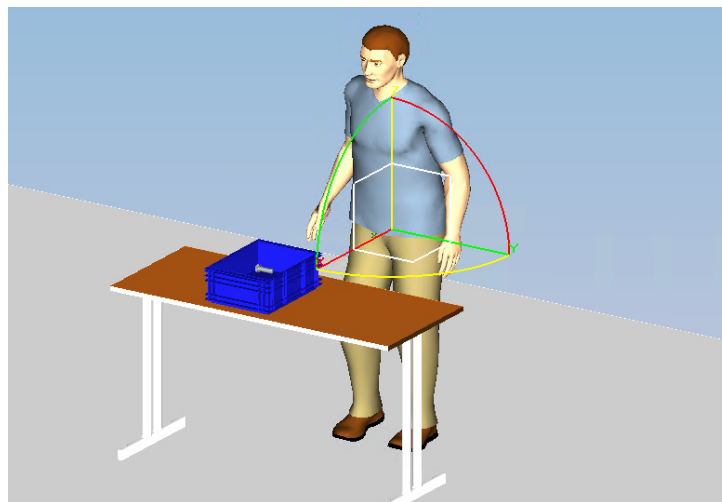


Abbildung 3.25: Platzieren des *Jack-Modells* über den *Placement Manipulator*

Mit der Schnittstelle ist es auch möglich, während des Keyframings Objekte zu greifen und wieder abzulegen (ohne Änderung der Handhaltung). Um ein Objekt zu greifen, wird zunächst die Körperhaltung des *Jack-Modells* mit der Eingabepuppe so eingestellt, dass dieses zum Objekt hinlangt. Daraufhin wird über *Create Op.* ein Keyframe erzeugt. Anschließend wird das zu greifende Bauteil ausgewählt und der *Attach-Button* gedrückt, entsprechend der Hand, die das Objekt berührt. Der Text des Buttons ändert sich daraufhin zu *Detach*. Das Objekt ist nun fix mit der Hand verbunden. Ändert sich die Position oder die Orientierung der Hand, wird das Objekt nachgeführt. Ebenfalls wurde der zuvor erstellten Operation ein *Human Attach Event* hinzugefügt, sodass auch in der Simulation an dieser Stelle Hand und Teil verbunden sind. Das Menschmodell wird daraufhin in die Körperhaltung gebracht, in der das Bauteil abgelegt wird, was durch den *Create Op.-Button*, abgeschlossen wird. Um das Bauteil dann loszulassen, wird der *Detach-Button* betätigt. Objekt und Hand sind daraufhin

entkoppelt, die Button-Aufschrift ändert sich wieder zu *Attach* und der zuvor erstellten Operation wurde ein *Human Detach Event* hinzugefügt. Wird nun die Simulation abgespielt, langt das Menschmodell zum Objekt hin, greift dieses und legt dieses wieder ab. Abbildung 3.26 zeigt einen Zeitpunkt dieser Simulation, nachdem eine Schraube gegriffen wurde und zum Ablageort gebracht wird. Ebenfalls ist der *Sequence Editor* mit einem Gantt-Diagramm der insgesamt drei Operationen dargestellt. Im Gantt-Diagramm sind zudem die *Human Events*, also das Greifen und Loslassen der Schraube dargestellt.

Zusätzlich kann das Eingabegerät noch kalibriert werden, indem die Gelenk-Offset-Werte eingestellt werden. Dazu müssen alle Gelenke referenziert sein und manuell in die Nullposition gesetzt werden. Anschließend werden die Gelenk-Offset-Werte ermittelt und abgespeichert.

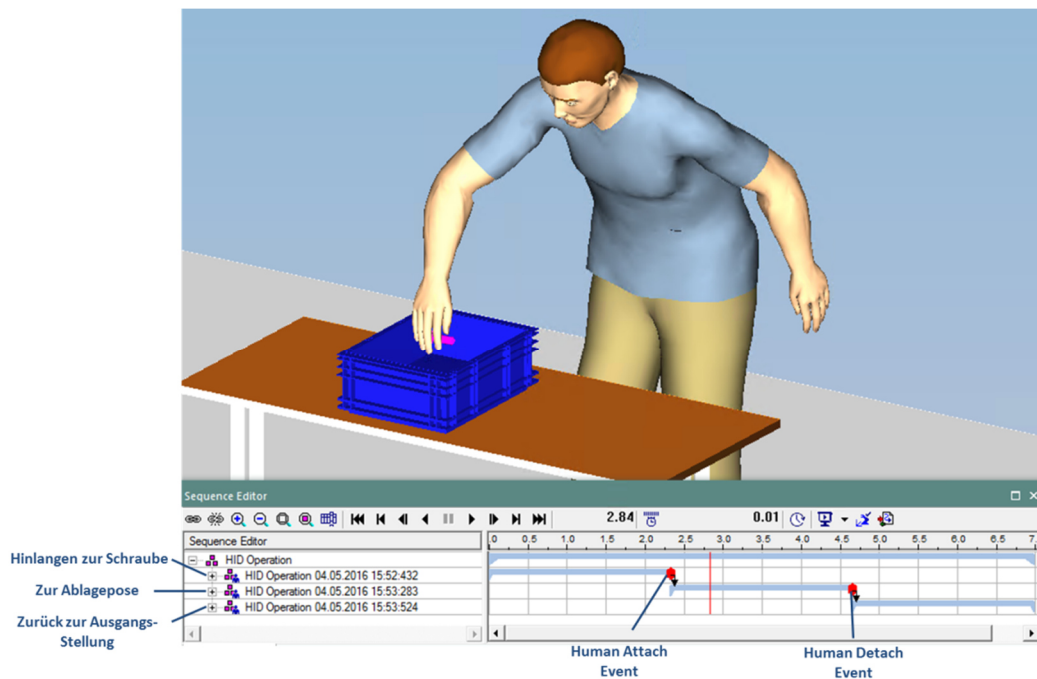


Abbildung 3.26: Zeitpunkt der Simulation eines Aufnehmen-und-Platziervorgangs

4 Evaluation

In diesem Kapitel wird die Evaluation des *Human Input Device* betrachtet. Ausgehend von Vorbetrachtungen werden diesbezüglich zwei Nutzerstudien vorgestellt. Die erste Nutzerstudie untersucht detailliert die Kernfunktion des *Human Input Device* – die Manipulation der Körperhaltung eines arbeitswissenschaftlichen, digitalen Menschmodells. Aufgrund des relativ hohen Aufwands der Teilnehmer wird die Studie nicht mit Endanwendern, sondern mit Laien auf dem Gebiet der Ergonomiesimulation durchgeführt. Die zweite Nutzerstudie beurteilt dann, in gröberer Granularität und mit geringerem Aufwand für die Teilnehmer, die Anwendung des *Human Input Device* im Gesamtkontext der Ergonomiesimulation.

4.1 Vorbetrachtung

In den Vorbetrachtungen wird zunächst die Gebrauchstauglichkeit als Beurteilungskriterium der Evaluation festgelegt und erläutert. Danach wird die Evaluation der Gebrauchstauglichkeit zunächst im Allgemeinen betrachtet und anschließend die des *Human Input Device* im Speziellen.

4.1.1 Auswahl der Gebrauchstauglichkeit als Evaluationsziel

Allgemein lässt sich der Begriff der Evaluation wie folgt definieren:

„Evaluation ... bezeichnet eine systematische und möglichst objektive Bewertung eines geplanten, laufenden oder abgeschlossenen Projekts. Ziel ist es, spezifische Fragestellungen zu beantworten und/oder den Zielerreichungsgrad eines bestimmten Vorhabens zu erheben“ (Sarodnick & Brau, 2011)

Ehe die Methode der Bewertung festgelegt wird, sind zunächst die Definition der spezifischen Fragestellung sowie das Ziel und dessen Erreichungsgrad von Bedeutung. Im Rahmen der Evaluation des Eingabegeräts in dieser Arbeit soll folgende Fragestellung beantwortet werden:

Eignet sich der Typ der entwickelten Benutzungsschnittstelle in Form einer menschenähnlichen Puppe besser für Generierung von Bewegungen arbeitswissenschaftlicher Menschmodelle als die konventionellen Benutzungsschnittstellen, die auf Maus und Tastatur basieren?

Das Ziel der Evaluation gemäß der Fragestellung besteht also darin, den Grad der Eignung eines Eingabegeräts bzw. einer Benutzungsschnittstelle für die Ergonomiesimulation und dessen Menschmodell festzustellen. Es stellt sich nun Frage, mit welchem Kriterium eine solche Eignung bewertet werden kann. Prinzipiell lassen sich zahlreiche Kriterien nennen,

durch die sich Bedienung und Ergebnisse bei der Verwendung unterschiedlicher Benutzungsschnittstellen unterscheiden. Einige dieser Kriterien sind beispielhaft folgend aufgeführt:

- Zeitlicher Aufwand
- Ergebnisgüte/-qualität
- Benutzerfreundlichkeit
- Intuitive Bedienbarkeit
- Benutzerakzeptanz
- Schweregrad d. Erlernbarkeit
- ...

Es wird schnell deutlich, dass eine eindimensionale Betrachtung einzelner Kriterien keine hinreichende Aussagekraft für die Beurteilung der Eignung einer Benutzungsschnittstelle darstellt. Zum Beispiel könnte mit einer Benutzungsschnittstelle eine Aufgabe schneller durchgeführt werden als mit einer anderen, jedoch einhergehend mit einer geringeren Ergebnisgüte.

Die ISO 9241-420 zur Auswahlverfahren von physikalischen Eingabegeräten sieht als Bewertungskriterium das Konzept der Gebrauchstauglichkeit (engl. Usability) vor. Diese mehrdimensionale Größe ist nach ISO 9241-11 genormt und wie folgt definiert:

Gebrauchstauglichkeit ist „das Ausmaß, in dem ein Produkt durch bestimmte Benutzer in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden kann, um bestimmte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen“ (ISO 9241-11)

Abbildung 4.1 verdeutlicht das Konzept der Gebrauchstauglichkeit noch einmal detaillierter. Das Produkt, in diesem Fall das Eingabegerät bzw. die Benutzungsschnittstelle wird in einem Nutzungskontext verwendet. Zu diesem gehört der Benutzer, der mit dem Produkt eine Arbeitsaufgabe erfüllen soll. Hierzu verwendet er zur Verfügung gestellte Arbeitsmittel und tut dies in einer Umgebung. Der Benutzer strebt dabei ein bestimmtes Ziel an. Auf der anderen Seite ergibt sich aus der Nutzung ein Ergebnis. Dieses lässt sich über die Größen: Effektivität, Effizienz und Zufriedenstellung messen. ISO 9241-11 definiert dabei diese Größen wie folgt:

- Effektivität:* „Die Genauigkeit und Vollständigkeit, mit der Benutzer ein bestimmtes Ziel erreichen.“
- Effizienz:* „Der im Verhältnis zur Genauigkeit und Vollständigkeit eingesetzte Aufwand, mit dem Benutzer ein bestimmtes Ziel erreichen“
- Zufriedenstellung:* „Freiheit von Beeinträchtigungen und positive Einstellungen gegenüber der Nutzung des Produkts“

Das Ausmaß der Erreichung vom Ergebnis, das sich mit diesen Größen messen lässt, im Vergleich zum Ziel stellt die Gebrauchstauglichkeit dar.

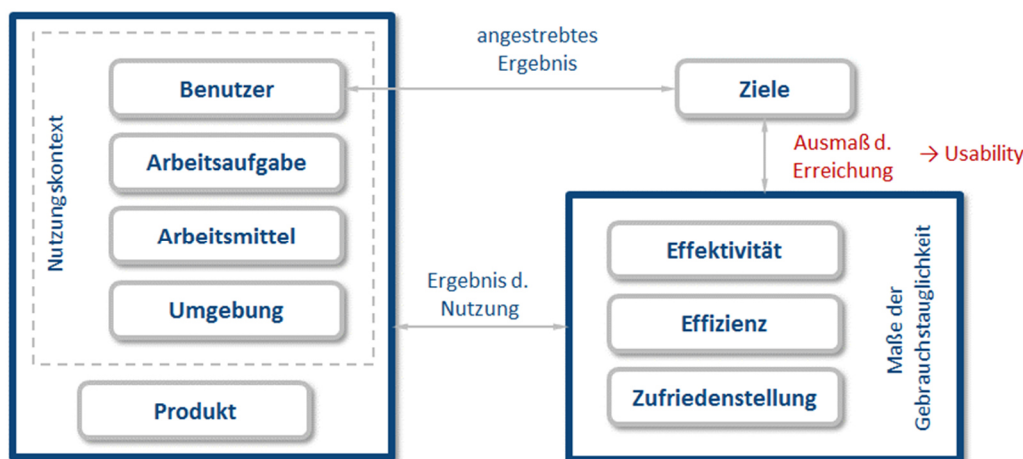


Abbildung 4.1: Anwendungsrahmen für Gebrauchstauglichkeit (in Anl. an ISO 9241-11)

Die Gebrauchstauglichkeit, die mit einem Produkt erreicht werden kann, ist nicht als isolierte Eigenschaft zu sehen, sondern ist abhängig vom Kontext, in dem es genutzt wird und von dem angestrebten Ziel. Zentrales Element im Nutzungskontext stellt dabei der Benutzer dar. Dessen Effekte auf die Gebrauchstauglichkeit lassen sich in Effekte der Benutzermerkmale und Effekte der Nutzungserfahrung unterscheiden. Als einflussgebende Benutzermerkmale lassen sich Erfahrung, Domänenkenntnisse, kultureller Hintergrund, Eingeschränktheit sowie Alter und Geschlecht nennen. Die Effekte auf die Nutzungserfahrung verdeutlicht Abbildung 4.2. Nach dieser idealisierten Darstellung steigt die Usability mit zunehmender Anzahl an Wiederholungen der Nutzung. Dies liegt daran, dass sich die Effektivität und insbesondere die Effizienz durch Lerneffekte erhöhen. Die Gebrauchstauglichkeit der ersten Nutzung wird als *Guessability* bezeichnet. Mit zunehmender Nutzung steigt die Gebrauchstauglichkeit in einen Bereich der Sättigung hin zur *Experienced User Usability*. Zwischen diesen beiden Größen befindet sich die *Re-Usability*, die erreicht wird, wenn nach längerem Abstand die Arbeit mit dem Produkt wieder aufgenommen wird. Die *Learnability* gibt den zeitlichen Abstand der ersten Nutzung bis zur Erreichung der *Experienced User Usability* an. (Jordan, 1998)

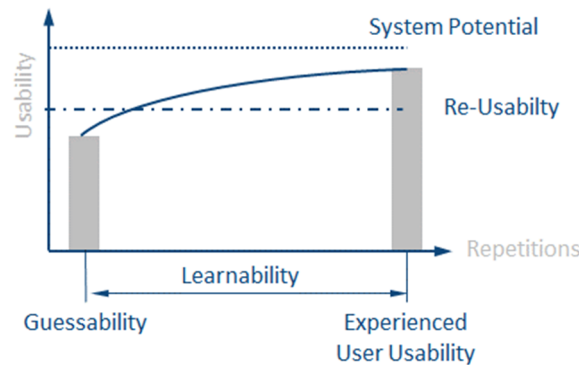


Abbildung 4.2: Die fünf Komponenten der Gebrauchstauglichkeit entlang der Lernkurve (in Anl. an Jordan, 1998)

Es lässt sich demnach für die Evaluation der entwickelten Benutzungsschnittstelle festhalten, dass anhand der Gebrauchstauglichkeit verglichen werden kann, welches Eingabegerät sich besser für die Ergonomiesimulation eignet. Für die Evaluation ist es allerdings erforderlich, den Nutzungskontext zu definieren und das angestrebte Ziel zu betrachten.

4.1.2 Evaluation der Gebrauchstauglichkeit

Eine allgemeine Übersicht zur Evaluation der Gebrauchstauglichkeit zeigt Abbildung 4.3. Demnach sind zur Evaluation der Gebrauchstauglichkeit die Evaluationsziele, Art, Maße der Gebrauchstauglichkeit, Güte, Testpersonen und die Methode festzulegen. Diese Aspekte sind abgeleitet aus (Sarodnick & Brau, 2011; Jordan, 1998; Barnum, 2011; Dumas & Redish, 1999) und sollen im Folgenden kurz beschrieben werden.

Evaluationsziel

Grundsätzliches Ziel der Evaluation ist dabei die Beantwortung der Frage, wie gut ein Produkt ist, welches Produkt besser ist oder warum ein Produkt hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit schlecht ist.

Art

Die Art der Evaluation kann während der Entwicklung zur Verbesserung eines Produkts bzw. Teilen davon erfolgen (formativ) oder abschließend zur Gesamtbewertung eines Produkts (summativ).

Maße der Evaluation

Die Maße der Evaluation lassen sich zum einen danach unterscheiden, ob sie subjektiv oder objektiv erhoben werden. Objektive Maße sind prinzipbedingt besser direkt beurteilbar. Jedoch lassen sich bestimmte Maße nicht immer objektiv messen. Diese können dann evtl. über objektive Maße operationalisiert werden. Jedoch ist hierbei dann die Frage, wie weit diese Maße dann die Ursprünglichen abbilden. Gleiches gilt auch für die Unterscheidung

quantitativer oder qualitativer Maße. Darüber hinaus lassen sich die Maße auch nach der zu messenden Größe unterscheiden. Die Effektivität kann dabei über das Maß der Vollständigkeit oder der Genauigkeit gegenüber dem Ziel erfasst werden. Welche Größe verwendet werden kann, hängt dabei stark von der Aufgabe ab, die mit dem Produkt durchgeführt werden. Die Auswahl für die geeignete Messgröße der Effizienz gestaltet sich dagegen schon schwieriger. Die Fragestellung hierbei ist, welche Größe den Aufwand am besten abbildet. Dieser kann u. a. über die Messung physiologischer Parameter des Benutzers oder über dessen mentale Beanspruchung erfasst werden. Diese beiden Maße bilden den körperlichen und geistigen Aufwand des Benutzers ab. Daneben spiegeln Zeitbedarf, Fehlerrate und die Abweichung von einem kritischen Pfad den Arbeitsaufwand wider. Die Zufriedenstellung ist die subjektive Einschätzung des Benutzers und hängt davon ab, inwieweit das Produkt dessen Erwartungen erfüllt.

Güte der Evaluation

Ein ebenfalls wichtiger Aspekt der Evaluation der Gebrauchstauglichkeit ist die zu erzielende bzw. die erzielte Güte. Diese lässt sich über die Reliabilität, Validität und Objektivität ausdrücken. Die Reliabilität drückt die Verlässlichkeit aus. Sie steigt etwa mit der Anzahl an Teilnehmern (Sarodnick & Brau, 2011). Die Validität stellt dar, inwieweit die evaluierte Gebrauchstauglichkeit der tatsächlichen Gebrauchstauglichkeit entspricht. Dies hängt unter anderem davon ab, ob der Nutzungskontext inkl. ausgewählter Teilnehmer mit der Realität übereinstimmt und ob die erhobenen Größen tatsächlich mit den Messgrößen der Gebrauchstauglichkeit übereinstimmen.

Auswahl der Testpersonen

Die Auswahl der Testpersonen ist ebenfalls ein wichtiges Kriterium der Evaluation der Gebrauchstauglichkeit. Zum einen stellt sich die Frage nach der Zusammensetzung von Testpersonen. Eine Evaluation kann entweder ohne Testpersonen unter Verwendung einer repräsentativen Stichprobe oder in Ausnahmefällen unter der gesamten Grundgesamtheit erfolgen. Des Weiteren muss bei der Evaluation definiert werden, ob Domänenexperten, Usability-Experten oder unerfahrene Testpersonen eingesetzt werden. Darüber hinaus spielt für die erfasste Gebrauchstauglichkeit eine Rolle, welche Nutzungserfahrung sie mit dem Produkt haben. Wie in 4.1.1 aufgezeigt, ist die erzielte Gebrauchstauglichkeit eines Produktes davon abhängig, wie oft die Teilnehmer die Aufgaben in dem Nutzungskontext durchgeführt haben.

Methode

Zur Evaluation der Gebrauchstauglichkeit steht eine Vielzahl an verschiedenen Methoden zur Verfügung. Diese lassen sich generell in empirische und nicht empirische Methoden unterteilen. Nicht empirische Methoden basieren dabei auf formalen, analytischen Ansätzen

(Sarodnick & Brau, 2011). Auf die Beschreibung der einzelnen Methoden in Abbildung 4.3 wird an dieser Stelle verzichtet. Eine detaillierte Erläuterung ist in Jordan (Jordan, 1998) aufzufinden.

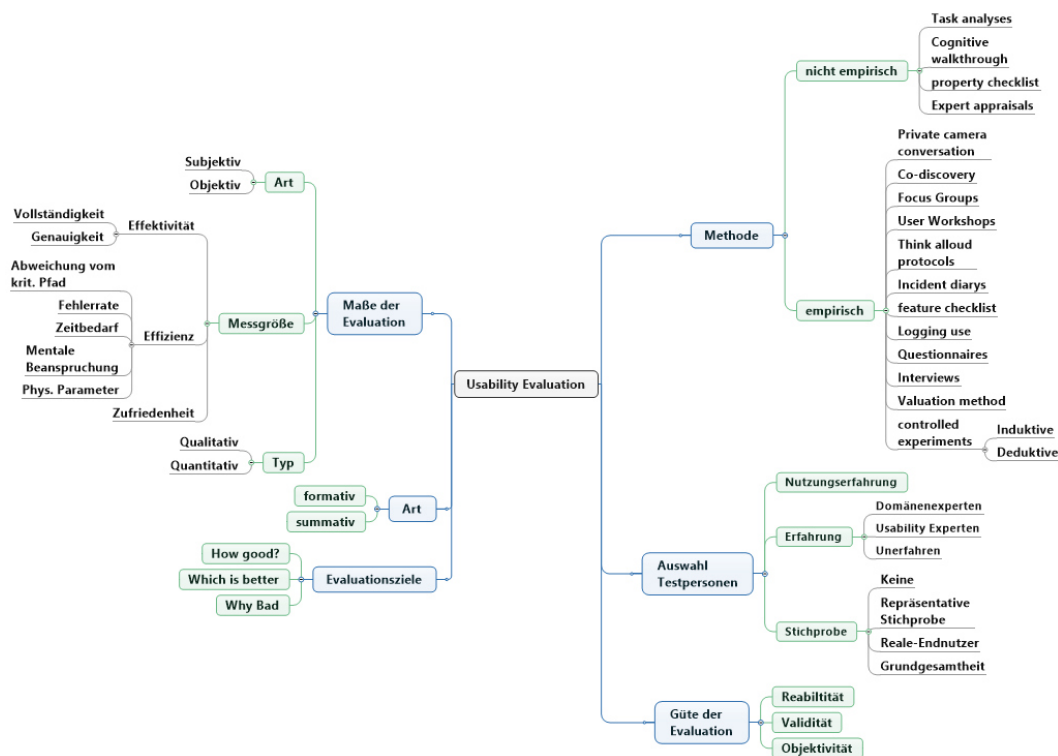


Abbildung 4.3: Evaluation der Gebrauchstauglichkeit (in Anl. an Sarodnick & Brau, 2011; Jordan, 1998; Barnum, 2011; Dumas & Redish, 1999)

4.1.3 Gebrauchstauglichkeit des *Human Input Device* zur Bewegungserzeugung eines arbeitswissenschaftlichen Menschmodellen

Wie in 4.1.1 beschrieben, stellt die Gebrauchstauglichkeit keine isolierte Eigenschaft eines Produktes dar, sondern hängt davon ab in welchem Nutzungskontext das Produkt eingebettet wird und welches Ziel der der Benutzer verfolgt.

Abbildung 4.4 beschreibt die einzelnen Komponenten, aus denen die Gebrauchstauglichkeit einer Benutzungsschnittstelle für ein arbeitswissenschaftliches digitales Menschmodell besteht. Daraufgehend werden die einzelnen Komponenten detaillierter beschrieben.

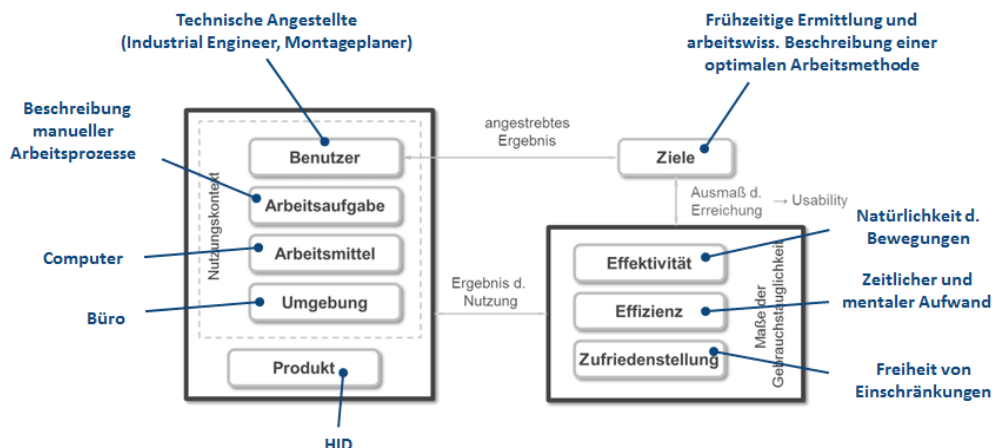


Abbildung 4.4: Gebrauchstauglichkeit bei der Ergonomiesimulation(in Anl. an ISO 9241-11)

Produkt

Das Produkt ist das zentrale Element und Untersuchungsgegenstand zur Evaluation der Gebrauchstauglichkeit, also in diesem Fall die Benutzungsschnittstelle. Diese besteht aus Hardware, dem Eingabegerät, und Software. Da in dieser Arbeit evaluiert werden soll, welche Benutzungsschnittstelle sich besser für die Bewegungsgenerierung eines arbeitswissenschaftlichen Menschmodells eignet, werden einmal als Produkt die konventionelle Benutzungsschnittstelle und einmal die entwickelte Benutzungsschnittstelle betrachtet. Die mit den unterschiedlichen Produkten erzielte Gebrauchstauglichkeit kann dann miteinander verglichen werden.

Umgebung

Die Umgebung, in der Ergonomiesimulationen hauptsächlich erstellt werden, ist die normale Umgebung eines Büros. Andere, deutlich seltener vorkommende, denkbare Szenarien wären die Anwendung in Besprechungsräumen bei Workshops oder in fertigungsnahen Einrichtungen bei Produktionsvorbereitungswshops.

Arbeitsmittel

Verwendete Arbeitsmittel stellen hauptsächlich ein Schreibtisch mit Computer und die Ausgabe über den Bildschirm dar. Seltener in Besprechungen und Workshops kann die Ausgabe auch über einem Beamer oder über größere Bildschirme erfolgen.

Arbeitsaufgabe

Generell besteht die Arbeitsaufgabe bei der Ergonomiesimulation darin, eine Arbeitsmethode zu beschreiben und zu bewerten. Dabei fallen drei Teilaufgaben an. Dies sind im Einzelnen: Aufbau des Szenarios, Bewegungsgenerierung des Menschmodells und Analyse. In dieser Arbeit soll die Gebrauchstauglichkeit bei der Teilaufgabe der Bewegungsgenerierung des Menschmodells evaluiert werden. Je nachdem mit welcher Methode die Bewegung des

Menschmodells generiert wird, ist es hierbei notwendig, die Körperhaltung des Menschmodells zu manipulieren.

Anwender

Die Anwender bzw. Benutzer der Tools für die Ergonomiesimulation sind i.d.R. technische Angestellte wie etwa Arbeitsplaner bzw. Mitarbeiter aus dem Industrial Engineering oder Produktionsplaner manueller Prozesse. Die Mitarbeiter sind entweder direkt in den produzierenden Unternehmen angestellt, üben die Tätigkeit extern als Dienstleistung aus oder als Lieferant für Produktionsanlagen. Aufgrund mangelnder Erhebung über die Geschlechter- und Altersverteilung der Anwender von Programmen zur Ergonomiesimulation sollen Hinweise hierüber über die Verteilung erwerbstätiger Ingenieure entnommen werden.

Tabelle 4.1: Geschlechter- und Altersverteilung erwerbstätiger Ingenieure (VDI, 2014)

Geschlecht		Alter	
Männlich	275.000	≤ 34 Jahre	347.000
Weiblich	138.600	35-49 Jahre	729.000
		≥ 50 Jahre	585.000

Ziele

Das übergeordnete Ziel der Ergonomiesimulation besteht darin, einen unter ergonomischen und zeitwirtschaftlichen Aspekten optimalen manuellen Arbeitsprozess zu ermitteln. Die betrachtete Teilaufgabe der Bewegungsgenerierung hat als Ziel, eine unter zeitwirtschaftlichen und ergonomischen Aspekten optimale Bewegung zu generieren. Hierfür ist es notwendig insoweit natürliche Bewegungen zu erzeugen, wie sie für die zeitwirtschaftliche und ergonomische Analyse relevant sind.

Effektivität

Die Effektivität der Nutzung lässt sich zunächst über das Kriterium der Vollständigkeit dadurch ausdrücken, ob sich die gewünschten Bewegungen grundsätzlich generieren lassen, was bei der Ergonomiesimulation in der Regel der Fall ist. Darüber hinaus beschreibt die Effektivität die Genauigkeit der generierten Bewegung, also über den Grad der Übereinstimmung von geplanter zu erzielter Bewegung.

Effizienz

Die Effizienz bei der Bewegungsgenerierung drückt aus, wie viel Aufwand für die erzielte Genauigkeit aufgebracht wurde. Wie schon in 4.1.2 beschrieben, ist der Aufwand bei der Ermittlung der Gebrauchstauglichkeit nicht näher festgelegt und kann als mentaler Aufwand des Benutzers oder aber auch als zeitlicher Aufwand betrachtet werden. Da der zeitliche Aufwand bei der Bedienung von arbeitswissenschaftlichen Menschmodellen als größter Nachteil gilt (siehe 2.2.5), spielt dieser bei der Evaluation eine herausragende Rolle.

Zufriedenstellung

Die Zufriedenstellung bei der Gebrauchstauglichkeit von Benutzungsschnittstellen für die Bewegungsgenerierung lässt sich gegenüber anderen Produkten und Nutzungskontexten kaum näher spezifizieren. Sie spiegelt als subjektives Maß die Einschätzung und Erwartungen des Anwenders wider. Damit eine hohe Akzeptanz entsteht, sollte die Benutzungsschnittstelle möglichst frei von Einschränkungen sein.

4.2 Nutzerstudie zur Manipulation der Körperhaltung von Menschmodellen

Die erste Studie, die durchgeführt wurde, um die Gebrauchstauglichkeit der entwickelten Benutzungsschnittstelle mit der konventionellen Benutzungsschnittstelle zu vergleichen, stellt ein Experiment dar. Es wurde bereits an anderer Stelle vorgestellt (Wiegmann et al., 2017), soll aber hier noch einmal ausführlicher betrachtet werden.

Ziel des Experiments ist die Beantwortung folgender Fragestellung:

Weist die entwickelte Benutzungsschnittstelle entlang der Lernkurve bei der Manipulation der Körperhaltung eine höhere Gebrauchstauglichkeit auf, als die konventionelle auf Tastatur und Maus basierte Benutzungsschnittstelle?

Mit der Beantwortung dieser Fragestellung soll untersucht werden, ob es sinnvoll ist, bei der Bewegungsgenerierung auf das *Human Input Device* zurückzugreifen. Dies würde immer dann gelten, wenn es erforderlich ist, bei der Bewegungserzeugung das Menschmodell direkt zu manipulieren.

4.2.1 Studiendesign

In dem Experiment sollen Teilnehmer mit dem *Human Input Device* und mit der konventionellen Benutzungsschnittstelle innerhalb von *Process Simulate* (Version 12.1.3) die Körperhaltung des Menschmodells hinsichtlich verschiedener Zielposen manipulieren.

Aufgabenbeschreibung

In *Process Simulate* wurde ein Szenario mit sechs voneinander unabhängigen manuellen Arbeitsstationen aufgebaut. Jede Arbeitsstation bestehend aus Betriebsmitteln, Produkt und Menschmodell wurde doppelt angelegt. Dabei nimmt das Menschmodell einmal die Zielpose ein und einmal eine neutrale Ausgangspose. Abbildung 4.5 zeigt dies exemplarisch anhand der ersten Arbeitsstation. Links dargestellt ist das Menschmodell, das zu einer Schraube hinlangt, die sich in einem Kleinladungsträger befindet. Dieser befindet sich auf einem Tisch. Rechts daneben befinden sich die Positionen zwischen Kleinladungsträger, Schraube, Tisch und Menschmodell in der gleichen Konstellation zueinander. Lediglich das Menschmodell nimmt

eine neutrale Körperhaltung ein. Die Teilnehmer sollen nun nacheinander einmal mit der Maus und einmal mit dem *Human Input Device* die Körperhaltung des rechten Menschmodells an die linke Zielpose annähern. Aus den Beobachtungen bei der Manipulation der Körperhaltung soll ermittelt werden, ob bei der Aufgabe das Human Input Device eine höhere Gebrauchstauglichkeit aufweist.

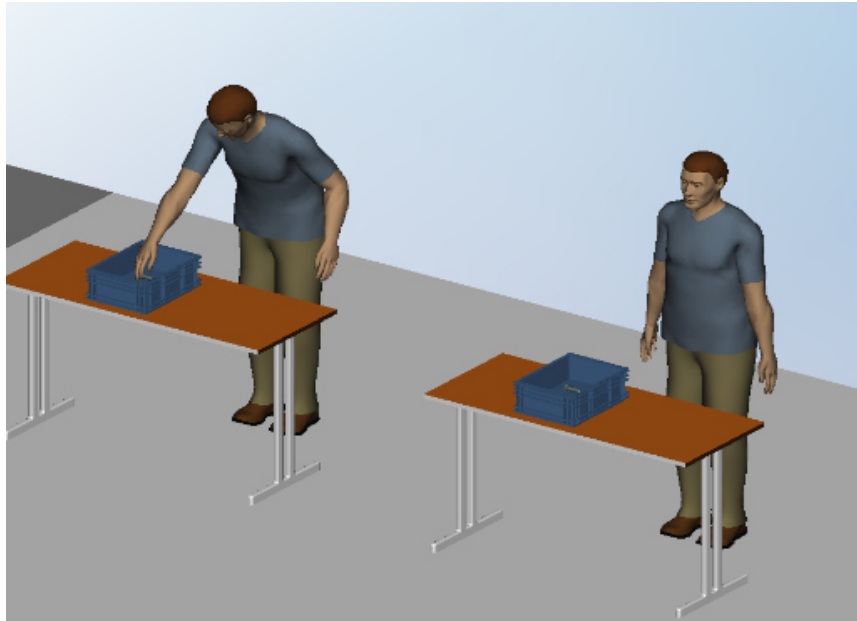


Abbildung 4.5: Ausgangs- und Zielpose der ersten Arbeitsstation (Wiegmann et al., 2017)

Eine Übersicht über alle Arbeitsstationen mit den entsprechenden Zielposen des Experiments zeigt die Abbildung 4.6.:

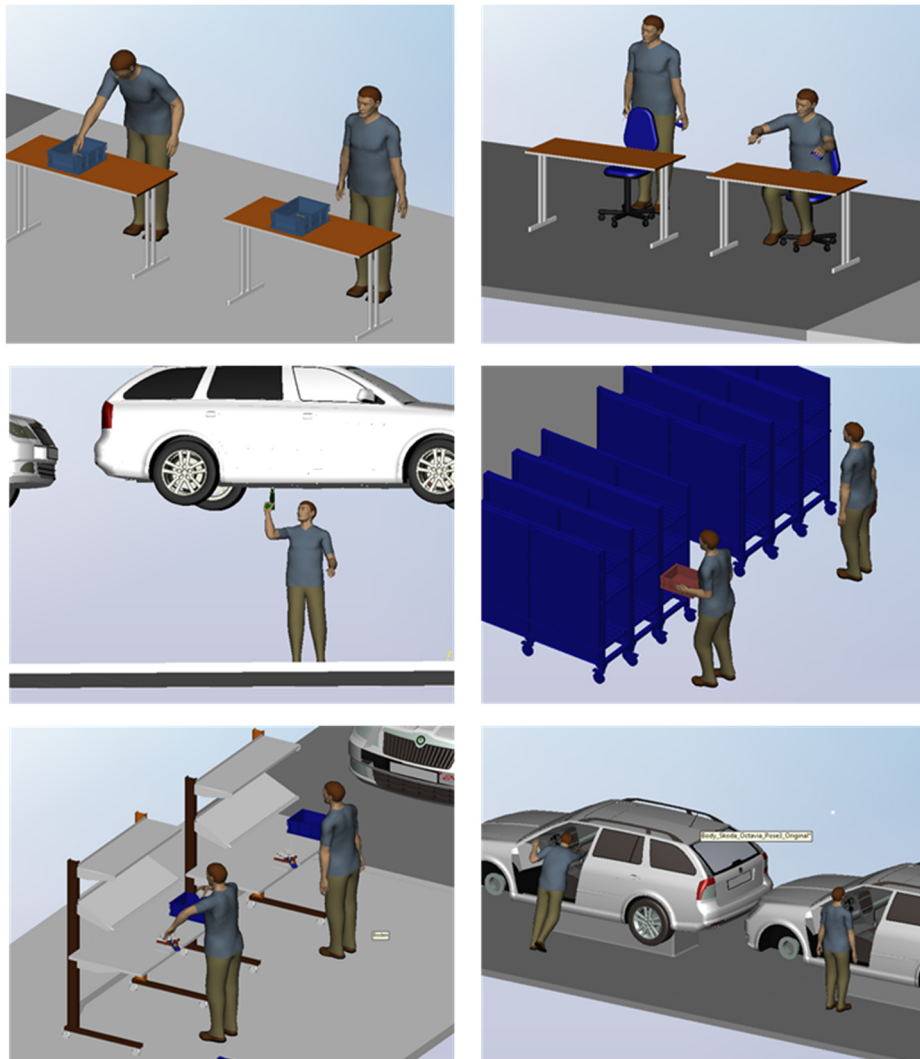


Abbildung 4.6: Übersicht der Arbeitsstationen und Zielposen des Experiments (in Anl. an Wiegmann et al., 2017)

Alle Posen stehen direkt in Bezug zu manuellen Produktionsprozessen. Die Zielposen der Arbeitsstationen bestehen dabei zu gleichen Teilen aus Posen, die das Ende einer abgeschlossenen Bewegung darstellen und zum anderen Teil aus Zwischenposen (Via Postures) einer Bewegung. Ebenso wurde ein Teil der Zielposen mit dem *Human Input Device* und der andere Teil der Posen mit der Maus erstellt. Dies erfolgte, um einen etwaigen Einfluss des Eingabegeräts, das bei der Erstellung genutzt wurde, auf die Ergebnisse auszugleichen. Im Folgenden soll kurz detaillierter auf die einzelnen Arbeitsstationen eingegangen werden.

Station 1: Hinlangen zu einer Schraube in einen KLT, der auf einem Tisch abgelegt ist. Hierbei nimmt das Menschmodell eine stehende Körperhaltung, die das Ziel der Hinlang-Bewegung darstellt. Die Zielpose wurde mit der mausbasierten Schnittstelle von *Process Simulate* modelliert

- Station 2: Bei der Zielpose sitzt das Menschmodell auf einem Stuhl. Dabei platziert es mit beiden Händen ein Werkstück (eine Betätigungswippe eines Lochers) und ein Werkzeug (eine Zange) zueinander. Die Pose ist eine Zwischenpose, die mitten in der Bring-Bewegung anfällt. Sie wurde mit dem Human Input Device modelliert. In der Ausgangstellung befindet sich das Menschmodell hinter dem Stuhl. Neben der Körperhaltung müssen die Teilnehmer ebenfalls die Position des Menschmodells verschieben. Lage und Orientierung von Werkstück und Werkzeug sind fest mit der Hand fixiert. Wird der Arm bewegt, bewegen sich die Objekte entsprechend mit.
- Station 3: Bei der Zielpose, die das Ende einer Platzierbewegung darstellt, steht das Menschmodell unter einer Fahrzeugkarosserie. Dabei setzt es einen Schrauber an einem am Unterboden befindlichen Schraubpunkt. In der Ausgangspose (in Abbildung 4.6 nicht sichtbar) befindet sich das Menschmodell in der neutralen Ausgangsstellung unterhalb der Fahrzeugkarosserie. Die Zielpose wurde mit der Maus modelliert. Der Schrauber ist fest mit der rechten Hand verbunden.
- Station 4: Das Menschmodell befindet sich in aufrechter Körperhaltung vor einem Regal und hält mit beiden Händen einen Kleinladungsträger. Die Vorgabepose ist eine Zwischenpose während des Platzierens des Kleinladungsträgers in das Regal. Sie wurde mit dem *Human Input Device* modelliert. Der Kleinladungsträger ist an die rechte Hand fixiert.
- Station 5: Die Zielpose beschreibt eine Körperhaltung während einer zusammengesetzten Bewegung. Sie stellt demnach eine Zwischenpose dar. Das Menschmodell steht vor einem Tisch, auf dem eine Vorrichtung fixiert ist. Das Menschmodell lässt diese Vorrichtung mit der linken Hand gerade los. Die rechte Hand befindet sich in einer Platzierbewegung eines Werkstücks in einen Kleinladungsträger. Die Pose wurde mit dem *Human Input Device* modelliert. Das Werkstück ist mit der rechten Hand fixiert.
- Station 6: Das Menschmodell nimmt eine Pose ein, die das Ziel einer Hinlangbewegung darstellt. Dabei langt es mit der rechten Hand an die Mittelkonsole im Innenraum eines Fahrzeuges. Die linke Hand stützt sich dabei auf der Instrumententafel ab. Um das Menschmodell in die Zielpose zu modellieren, muss dabei das Menschmodell innerhalb der Position, Orientierung und Körperhaltung verändert werden. Die Körperhaltung wurde mit der Maus modelliert.

Die Durchführung dauert dabei so lange bis eines der beiden Abbruchkriterien erfüllt ist:

Kriterium 1: Nach Ermessen des Teilnehmers stimmt die Körperhaltung in Bezug auf Natürlichkeit und Realitätsgüte des Menschmodells hinreichend genau mit der Zielpose überein.

Kriterium 2: Der Teilnehmer erkennt, dass er keine Fortschritte mehr erzielt. Trotz weiteren Bemühens wird die Körperhaltung des Menschmodells nicht natürlicher bzw. realitätsgetreuer.

In Abbildung 4.7 ist, gemäß der beiden Abbruchkriterien, vereinfacht dargestellt, inwiefern des Endes der Manipulationsvorgangs zustande kommen kann.

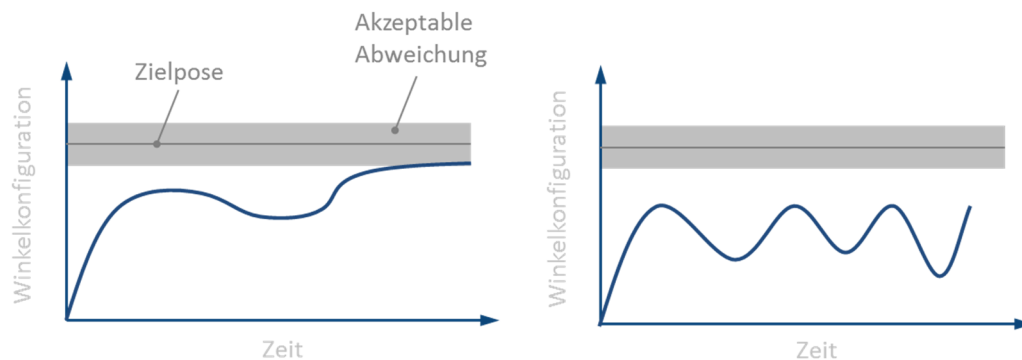


Abbildung 4.7: Vereinfachte Darstellung der Abbruchkriterien, links: Kriterium 1, rechts: Kriterium 2

Teilnehmer

Die Teilnehmer sind Studierende der Fakultät Maschinenbau der Hochschule *Ostfalia*. Sie waren Laien und hatten keine Erfahrung auf dem Gebiet der Ergonomiesimulation oder mit digitalen, arbeitswissenschaftlichen Menschmodellen. Ebenfalls hatten sie keine Erfahrung mit einem Graspable User Interface zur Einstellung einer kinematischen Kette. Die Teilnehmer wurden über eine hochschulinterne Anzeige akquiriert. Insgesamt nahmen 14 Teilnehmer an der Nutzerstudie teil.

Anzahl Versuche je Teilnehmer

Um den Einfluss der Lernkurve auf die Gebrauchstauglichkeit in dem Experiment abzubilden, durchläuft jeder Teilnehmer das Testfeld aus den sechs Arbeitsstationen insgesamt sieben Mal. Die ersten sechs Durchläufe werden dabei in relativ kurzen Abständen durchgeführt. Der Abstand zwischen diesen Durchläufen beträgt maximal 2 Tage, es wurden maximal zwei Durchläufe unmittelbar hintereinander durchgeführt. Danach erfolgte der nächste Durchlauf frühestens am folgenden Werktag. Der siebte Durchlauf wurde in einem Abstand von drei Wochen zum sechsten Durchlauf durchgeführt.

Betrachtung der Variablen

Die Variablen des Experiments lassen sich wie folgt klassifizieren:

Der Typ der Benutzungsschnittstelle, der Durchlauf, sowie die Teilnehmer stellen die *unabhängigen Variablen* des Versuchs da. Diese Variablen werden entlang des Experiments verändert.

Dabei werden die entstehenden Auswirkungen auf die *abhängigen Variablen* beobachtet. Dies sind in diesem Experiment abgeleitete Größen zur Bestimmung der Gebrauchstauglichkeit. Als Maß der Effektivität soll die Natürlichkeit der Pose gemessen werden, also inwieweit die erzielte Pose in Bezug auf die Realitätstreue mit der vorgegeben Pose übereinstimmt. Um daraus die Effizienz zu bestimmen, wird zusätzlich der Zeitbedarf für das Einstellen der Körperhaltung bestimmt. Als letzte Komponente der Gebrauchstauglichkeit wird die Zufriedenstellung der Teilnehmer beim Einstellen der Körperhaltung erfasst.

Die Variablen, die neben den unabhängigen Variablen noch zusätzlich Einfluss auf die abhängigen Variablen haben, sollen konstant gehalten werden. Diese *konstant gehaltenen Variablen* sind in diesem Fall die vorgegeben Zielposen, sowie die Erfahrung der Teilnehmer mit der Ergonomiesimulation und mit Graspable User Interfaces zur Manipulation kinematischer Ketten. Durch den erstmaligen Kontakt damit kann somit die Intuitivität ermittelt werden, also die Gebrauchstauglichkeit bei der ersten Bedienung.

Die *kontrollierten Variablen* sind jene, die ggf. einen Einfluss auf die abhängigen Variablen haben, jedoch nicht konstant gehalten werden können. Da in diesem Experiment die Teilnehmer nacheinander die beiden unterschiedlichen Benutzungsschnittstellen zur Einstellung der Körperhaltung verwenden, handelt es sich um eine verbundene Stichprobe. Es ist anzunehmen, dass es einen Einfluss auf die abhängigen Variablen gibt, welches Eingabegerät als verwendet wird.

Störvariablen, also Variablen, die ungewollt Einfluss auf die abhängigen Variablen haben, sind im Wesentlichen tagesabhängige Leistungsschwankungen der Teilnehmer, z.B. durch Müdigkeit oder kurzfristige Ablenkung der Teilnehmer während des Versuchs.

Operationalisierung der abhängigen Variablen

Um die Auswirkung der unabhängigen Variablen auf die abhängigen Variablen zu messen, müssen die abhängigen Variablen ggf. operationalisiert werden. Für den Zeitbedarf ist dies nicht notwendig. Dieser kann direkt objektiv gemessen werden. Für jeden Teilnehmer i und jeden Durchlauf j sowie Eingabegerät k ($k = 1$ für Maus und $k = 2$ für das Human Input Device) wird der mittlere Zeitbedarf t_{ijk} über die sechs Stationen bestimmt.

Ein Maß der Genauigkeit der erzielten Pose wird über die Gelenkabweichungen zwischen Zielpose und erzeugter Pose ermittelt. Dabei wird für jede erzeugte Pose l der Betrag der Differenz der Winkelkonfiguration aus der Zielpose \vec{q}_{Ziel} und erzeugten Pose $\vec{q}_{erzeugt}$ gebildet, sodass eine objektive metrische Größe für die Genauigkeit entsteht.

$$g_{ijkl} = \left| \vec{q}_{Ziel_l} - \vec{q}_{erzeugt_{ijkl}} \right|$$

Als Kennzahl für die Genauigkeit je Durchgang, Teilnehmer und Eingabegerät g_{ijk} werden die erzielten Genauigkeiten g_{ijkl} über die Anzahl der Stationen arithmetisch gemittelt.

Das Maß z_{ijk} für die Zufriedenstellung der Benutzer wird aus der subjektiven Einschätzung der Teilnehmer entnommen. Dabei bewerten sie nach jedem Durchgang je Eingabegerät die Zufriedenstellung auf einer Ratingskala von 1-10. Dabei stellt eine 10 eine vollständige Zufriedenstellung und eine 1 eine vollständige Unzufriedenstellung dar.

Ausbalancierung der Reihenfolge der verbundenen Stichprobe

Um den Einfluss der Reihenfolge gleichmäßig auf die Ergebnisse auszugleichen, werden die Teilnehmer in zwei Gruppen A und B eingeteilt. Gemäß Abbildung 4.8 wechselt sich für jede Gruppe je Pose und Durchgang die Reihenfolge der Eingabemethode ab. Dabei beginnt die Gruppe A immer genau mit dem entgegengesetzten Eingabegerät als Gruppe B.

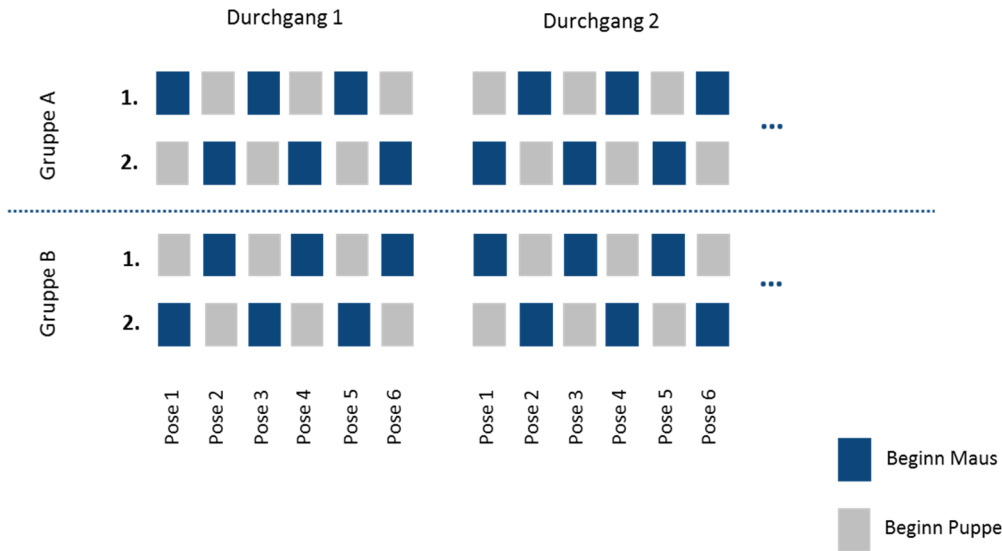


Abbildung 4.8: Ausbalancierung des Effekts der Reihenfolge auf die unabhängigen Variablen (in Anl. an Wiegmann et al., 2017)

Hypothesen

Ziel des Versuchs ist die Beantwortung der Frage, ob das Human Input Device beim Posing eine höhere Gebrauchstauglichkeit aufweist als die Tastatur und Maus. Da die Gebrauchstauglichkeit je Teilnehmer allerdings keine konstante Größe ist, sondern

insbesondere vom Lerngrad abhängt (siehe Abbildung 4.2), soll je Durchgang die Gebrauchstauglichkeit von Maus und Human Input Device verglichen werden. Hierzu soll zu jedem Durchgang überprüft werden, ob man mit dem *Human Input Device* das Posing in kürzerer Zeit, mit einer geringeren Abweichung und mit einer höheren Zufriedenstellung durchführt. Entsprechend werden folgenden Hypothesen formuliert:

1. $H_0: \mu_{t_{12}} \geq \mu_{t_{11}}$ *gegen* $H_1: \mu_{t_{12}} < \mu_{t_{11}}$
2. $H_0: \mu_{t_{22}} \geq \mu_{t_{11}}$ *gegen* $H_1: \mu_{t_{22}} < \mu_{t_{11}}$
- \vdots
8. $H_0: \mu_{g_{12}} \geq \mu_{g_{11}}$ *gegen* $H_1: \mu_{g_{12}} < \mu_{g_{11}}$
9. $H_0: \mu_{g_{22}} \geq \mu_{g_{11}}$ *gegen* $H_1: \mu_{g_{22}} < \mu_{g_{11}}$
- \vdots
15. $H_0: \mu_{z_{12}} \leq \mu_{t_{11}}$ *gegen* $H_1: \mu_{z_{12}} > \mu_{t_{11}}$
16. $H_0: \mu_{z_{22}} \leq \mu_{t_{11}}$ *gegen* $H_1: \mu_{z_{22}} > \mu_{t_{11}}$
- \vdots

4.2.2 Studiendurchführung

Einleitend, zu Beginn der Versuchsreihe, wurde jeder Teilnehmer zuvor in Bedienung und Umgang mit den beiden Benutzungsschnittstellen eingewiesen. Die Einweisung dauerte ca. 30 Minuten. Beim Human Input Device wurde den Teilnehmern zunächst vorgeführt, wie die Gelenkwinkel der Eingabepuppe mit beiden Händen eingestellt werden. Die Teilnehmer konnten sich anschließend selbst mit der Bedienung vertraut machen. Anschließend wurde nochmal speziell die Bedienung des Schultergelenks erläutert. Dieses Gelenk stellt insofern eine Besonderheit dar, da es ein dreidimensionales Gelenk durch drei seriell verschaltete eindimensionale Gelenke substituiert (siehe 3.2.3). Dadurch ist zwar prinzipiell jede statische Gelenkstellung, aber nicht jede Bewegung praktisch darstellbar. Dies wurde am Beispiel der Flexion des Schultergelenks in aufrechter Körperhaltung erläutert. Abbildung 4.9 zeigt die Ersatzbewegung, die den Teilnehmern für diesen Fall gezeigt wurde, mit denen die Körperhaltung nach der Flexion der Schulter eingestellt werden kann.

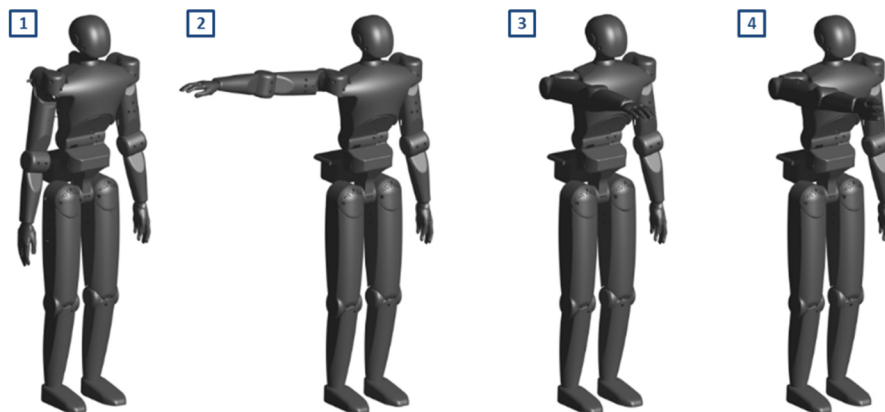


Abbildung 4.9: Ersatzbewegung des Human Input Device zur Flexion der Schulter

Für die Bedienung mit der Maus wurden den Teilnehmer die Dialoge zur Einstellung der Körperhaltung über Vorwärts- und inverser Kinematik gezeigt. Diese sind in Abbildung 4.10 dargestellt. Bei der Vorwärtskinematik wird dabei auf einem Bild des Menschmodells das Gelenk ausgewählt, dass in seiner Winkelkonfiguration geändert werden soll. Die Gelenkwinkel können dann über Regler eingestellt werden. Ebenfalls ist eine Eingabe von konkreten Werten für die einzelnen Winkel möglich. Bei der inversen Kinematik kann der Anwender einzelne Körperteile, die in ihrer Position und Orientierung verändert werden sollen, ebenfalls über das Bild anwählen. Daraufhin wird in der 3D-Ansicht ein Achs-System in das ausgewählte Körperteil eingeblendet. Über dieses Achs-System kann dann das Körperteil in Position und Orientierung geändert werden, indem man die Achsen, Ebenen, oder Bögen anwählt und in die gewünschte Richtung zieht. In Abhängigkeit von Lage und Position des Körperteils stellt sich dann die gesamte Körperhaltung des Menschmodells ein. Zusätzlich können dabei einzelne Körperteile in ihrer räumlichen Anordnung über das Bild im Menü gesperrt werden. Diese sind dann während der Manipulation über das Achs-System fixiert. Angelehnt an die Praxis, konnten die Teilnehmer während des Versuchs bei der Bedienung mit der Maus frei entscheiden, ob sie die Vorwärts-, die Inverse-Kinematik-Funktion oder eine Kombination daraus verwenden.

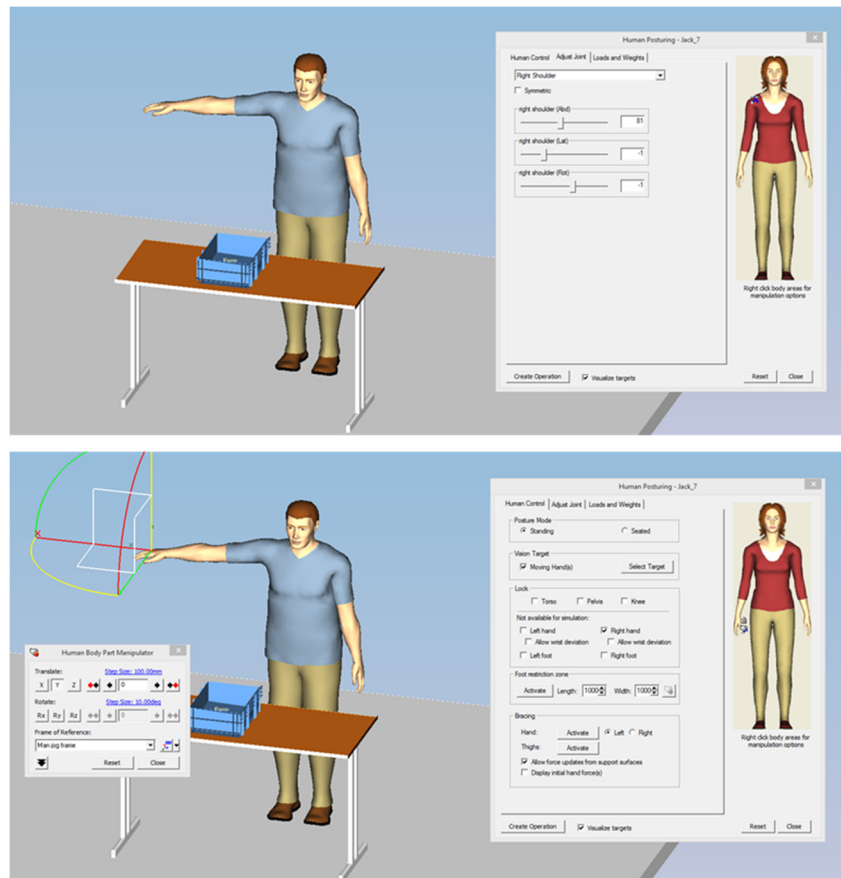


Abbildung 4.10: Einstellen der Körperhaltung des *Jack-Modells* über Vorwärts-(oben) und inverser Kinematik (unten)

Die Durchführung des Experiments fand anwendungsnah in einem Büro mit einem konventionellen Desktop-Computer statt. An dem Computer wurden zwei Bildschirme angeschlossen. Auf einem wurde die 3D-Ansicht eingeblendet und auf dem andern die Menüs zur Manipulation des Menschmodells mit der Maus bzw. des Human Input Device. Die Eingabepuppe wurde zu Anfang neben dem Bildschirm angeordnet (Abbildung 4.11). Die Teilnehmer wurden jedoch darüber informiert, dass sie die Position nach Belieben verändern konnten. Der Versuchsleiter saß während des Versuchs neben den Teilnehmern. Er gab den Teilnehmern vor jeder Messung mündlich ein Startsignal. Die Teilnehmer gaben, nachdem sie mit dem Einstellen der Körperhaltung fertig waren, eine mündliche Rückmeldung an den Versuchsleiter. Dieser hielt die jeweilige Zeitdauer fest und speicherte über die *Snapshot-Funktion* von *Process Simulate* das erzielte Ergebnis. Über ein eigens entwickeltes Plugin können daraus dann zur Auswertung die Gelenkstellungen des Menschmodells ausgelesen werden. Nach einem kompletten Durchlauf wurden die Teilnehmer mündlich befragt, wie zufrieden sie mit der Bedienung der beiden Eingabegeräte waren. Der Zeitbedarf für einen Durchlauf betrug ca. 1,5 Stunden.

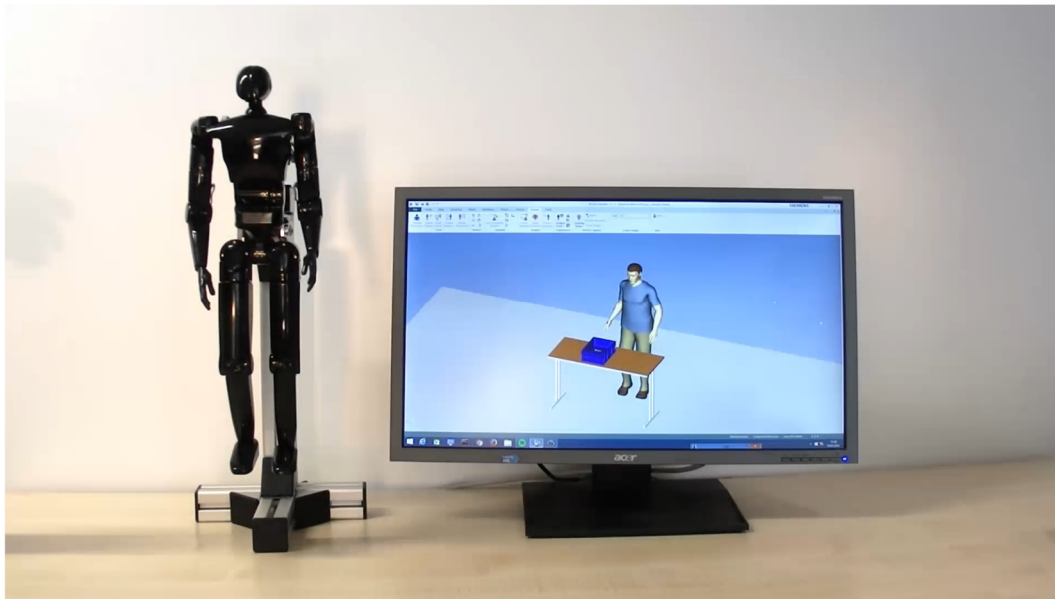


Abbildung 4.11: Ähnliche Anordnung von Monitor und Human Input Device während der Durchführung

4.2.3 Studiaauswertung

Deskriptive Beschreibung der Stichprobe

Abbildung 4.12 zeigt die zeitlichen Mittelwerte inkl. Konfidenzintervalle je Durchgang und Eingabegerät an. Dabei ist in diesem sowie in den folgenden Diagrammen in blau die Größen dargestellt, die mit der Maus erzielt wurden und in rot die dazu entsprechende Größe mit dem Human Input Device. Es ist erkennbar, dass die mit dem *Human Input Device* erzielten mittleren Zeitbedarfe je Durchgang stets geringer sind als die mit der Maus erzielten Mittelwerte. Tendenziell nimmt bei beiden Eingabegeräten der Zeitbedarf mit zunehmendem Lerneffekt ab. Der Effekt erscheint dabei bei der Maus stärker ausgeprägt zu sein. Im letzten Durchgang nach einer Zwischenzeit von drei Wochen nehmen in der Stichprobe die mittleren Zeitbedarfe gegenüber dem sechsten Durchlauf leicht zu.

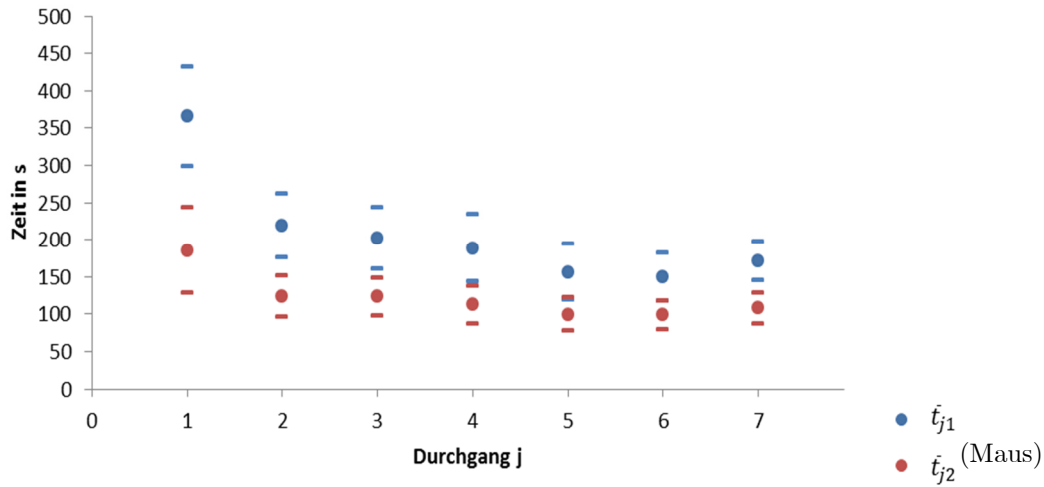


Abbildung 4.12: Mittelwerte der Zeitbedarfe \bar{t} mit Konfidenzintervallen ($\alpha = 5\%$) je Durchgang und Eingabegerät (in Anl. an Wiegmann et al., 2017)

Auch bei den Abweichungen sind die Mittelwerte je Durchgang, die mit dem *Human Input Device* erzielt worden sind, geringer (Abbildung 4.13). Allerdings zeichnet sich hier, entgegen der Zeitbedarfe, keine klare Abgrenzung der Konfidenzinterfalle ab. Auch ist hier keine deutliche Abnahme durch einen Lerneffekt zu erkennen. Auch wenn die Mittelwerte bei der Maus tendenziell in den ersten Durchläufen leicht abnehmen und nach dem siebten Durchlauf leicht ansteigen, relativiert sich dies in Bezug auf die relativ großen Konfidenzintervalle.

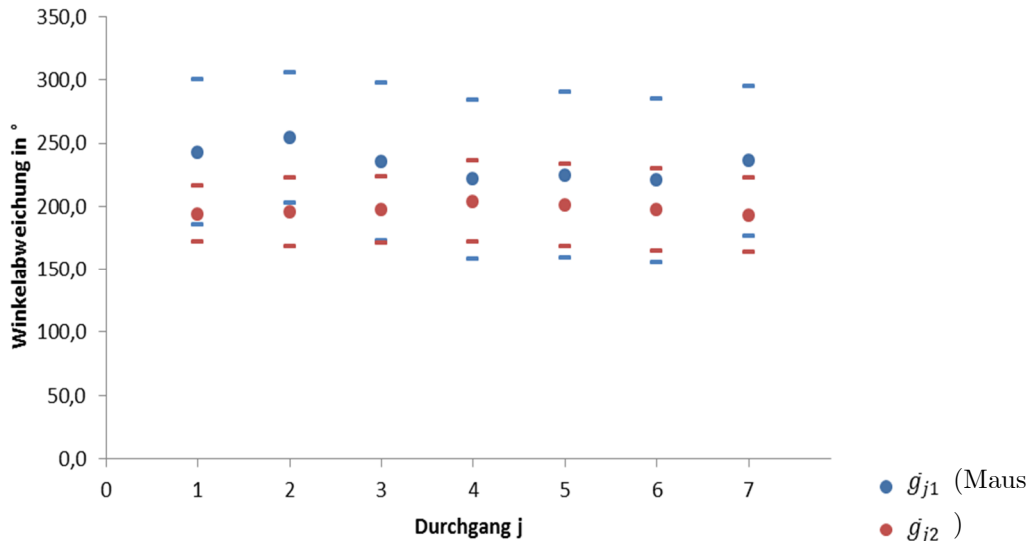


Abbildung 4.13: Mittelwerte der Abweichungen \bar{g} mit Konfidenzintervallen ($\alpha = 5\%$) je Durchgang und Eingabegerät (in Anl. an Wiegmann et al., 2017)

Bei den Benotungen der Zufriedenstellung wurden innerhalb der Stichprobe, ebenfalls im Mittel mit dem Human Input Device, höhere Werte erzielt. Bei der Bedienung mit der Maus steigt, insbesondere nach der ersten Bedienung, die mittlere Zufriedenstellung an.

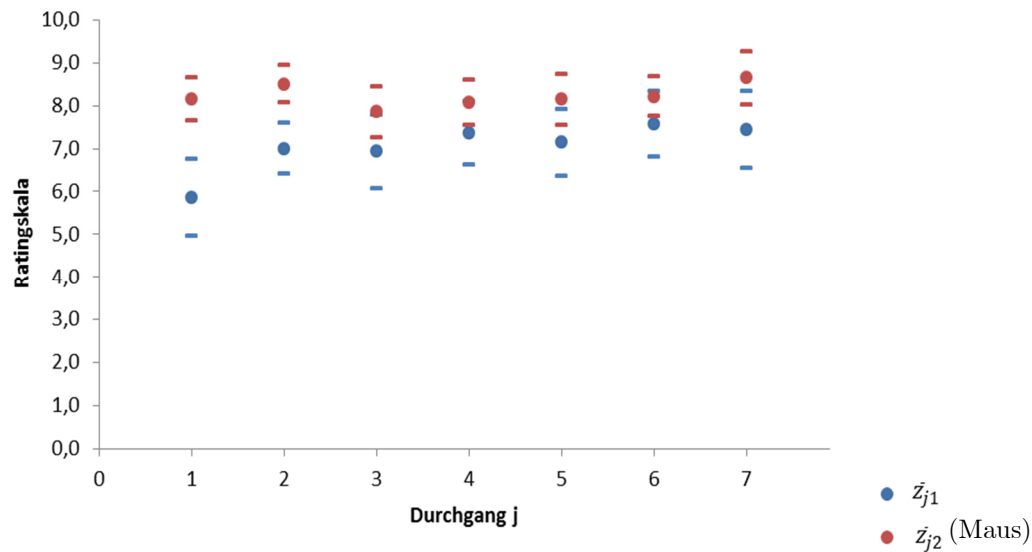


Abbildung 4.14: Mittelwerte der Zufriedenstellung \bar{z} mit Konfidenzintervallen ($\alpha = 5\%$) je Durchgang und Eingabegerät (in Anl. an Wiegmann et al., 2017)

Für die Wahl des geeigneten Tests und deren Voraussetzung zur Überprüfung der Hypothesen ist es von Bedeutung, ob die zu untersuchenden Variablen normalverteilt sind. Aufgrund der Stichprobengröße wurde zur Überprüfung dieses Punktes der Shapiro-Wilk-Test ausgewählt. Der Shapiro-Wilk-Test testet die Nullhypothese, dass die Grundgesamtheit, aus der die Stichprobe entnommen ist, normalverteilt ist, gegen die Alternativhypothese, dass diese nicht normalverteilt ist. Es wurde der Shapiro-Wilk-Test ausgewählt, da dieser auch bei geringem Stichprobenumfang eine relative hohe Teststärke gegenüber anderen Tests, wie etwa der Chi-Quadrat-Test oder der Kolmogorow-Smirnow-Test, besitzt (Holling & Gediga, 2016).

Die Tabelle 4.2 zeigt die Ergebnisse für die Tests der Variablen t je Durchlauf und Eingabegerät. In keinem Fall wurde die Nullhypothese verworfen, sodass für die weitere Auswertung davon ausgegangen wird, dass diese normalverteilt sind.

Tabelle 4.2: Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteileng der Variable t ($\alpha = 5\%$)

Variable	p	Testentscheid	Variable	p	Testentscheid
\bar{t}_{11}	0,088	H_0 beibehalten	\bar{t}_{12}	0,439	H_0 beibehalten
\bar{t}_{21}	0,724	H_0 beibehalten	\bar{t}_{22}	0,080	H_0 beibehalten
\bar{t}_{31}	0,720	H_0 beibehalten	\bar{t}_{32}	0,885	H_0 beibehalten
\bar{t}_{41}	0,400	H_0 beibehalten	\bar{t}_{42}	0,684	H_0 beibehalten
\bar{t}_{51}	0,310	H_0 beibehalten	\bar{t}_{52}	0,398	H_0 beibehalten
\bar{t}_{61}	,0403	H_0 beibehalten	\bar{t}_{62}	0,906	H_0 beibehalten
\bar{t}_{71}	0,406	H_0 beibehalten	\bar{t}_{72}	0,825	H_0 beibehalten

Die Ergebnisse der Untersuchung, ob die Variablen g je Durchlauf und Eingabegerät normalverteilt sind zeigt Tabelle 4.3. Während beim *Human Input Device* die Nullhypothesen in keinem Falle verworfen wurde, wurden bei der Maus mit vier Fällen in der Mehrheit die Nullhypothese abgelehnt werden. Für die weitere Auswertung wird davon ausgegangen, dass die Variable g_{j1} nicht normalverteilt und die Variable g_{j2} normalverteilt ist.

Tabelle 4.3: Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteileng der Variable g ($\alpha = 5\%$)

Variable	P	Testentscheid	Variable	p	Testentscheid
\bar{g}_{11}	0,067	H_0 beibehalten	\bar{g}_{12}	0,143	H_0 beibehalten
\bar{g}_{21}	0,28	H_0 beibehalten	\bar{g}_{22}	0,08	H_0 beibehalten
\bar{g}_{31}	0,058	H_0 beibehalten	\bar{g}_{32}	0,167	H_0 beibehalten
\bar{g}_{41}	0,004	H_0 ablehnen	\bar{g}_{42}	0,164	H_0 beibehalten
\bar{g}_{51}	0,015	H_0 ablehnen	\bar{g}_{52}	0,805	H_0 beibehalten
\bar{g}_{61}	0,02	H_0 ablehnen	\bar{g}_{62}	0,113	H_0 beibehalten
\bar{g}_{71}	0,01	H_0 ablehnen	\bar{g}_{72}	0,507	H_0 beibehalten

Die Testergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests für die Variablen z je Eingabegerät und Durchlauf zeigt Tabelle 4.4. Die Tests ergaben, dass in fünf von sieben Fällen ein Beibehalten der Nullhypothese. Es wird deshalb angenommen, dass die Variable z_{j1} normalverteilt ist. Bei der Variablen z_{j2} wird davon ausgegangen, dass diese nicht normalverteilt ist, da die Nullhypothese in sechs von sieben Fällen abgelehnt wurde.

Tabelle 4.4: Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteileng der Variable z ($\alpha = 5\%$)

Variable	p	Testentscheid	Variable	P	Testentscheid
\bar{z}_{11}	0,087	H ₀ beibehalten	\bar{z}_{12}	0,045	H ₀ ablehnen
\bar{z}_{21}	0,346	H ₀ beibehalten	\bar{z}_{22}	0,042	H ₀ ablehnen
\bar{z}_{31}	0,198	H ₀ beibehalten	\bar{z}_{32}	0,251	H ₀ beibehalten
\bar{z}_{41}	0,040	H ₀ ablehnen	\bar{z}_{42}	0,048	H ₀ ablehnen
\bar{z}_{51}	0,016	H ₀ ablehnen	\bar{z}_{52}	0,025	H ₀ ablehnen
\bar{z}_{61}	0,674	H ₀ beibehalten	\bar{z}_{62}	0,022	H ₀ ablehnen
\bar{z}_{71}	0,442	H ₀ beibehalten	\bar{z}_{72}	0,038	H ₀ ablehnen

Überprüfung der Hypothesen

Zur Überprüfung der Hypothesen kommen, bedingt durch die unterschiedlichen Verteilungen, zwei verschiedene Tests zur Anwendung. Zur Überprüfung der Hypothesen Nr. 1 bis 7 wurden t-Tests bei verbundenen Stichproben durchgeführt. Hierbei ist die Testvoraussetzung erfüllt, dass die zu vergleichenden Variablen normalverteilt sein müssen. Die übrigen Hypothesen wurden mit dem verteilungsfreien Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test durchgeführt. Da in diesem Fall multiple Hypothesen-Tests durchgeführt werden, erfolgt eine Korrektur der Irrtumswahrscheinlichkeit, um eine Kumulierung der Fehlerwahrscheinlichkeit entgegenzuwirken. Die Korrektur des Signifikanzniveaus erfolgt über die Bonferroni-Korrektur. Gem. Groß (Groß 2010) wird dabei das Signifikanzniveau α_i für die jeweilige Hypothese mit dem Index i wie folgt bestimmt:

$$\alpha_i = \frac{\alpha_g}{k} = \frac{0,05}{21} = 0,00239$$

Dabei stellt k die Anzahl an Hypothesen, hier 21, und α_g die Gesamt-Irrtumswahrscheinlichkeit dar, die hier 5 % beträgt.

In Tabelle 4.5 werden die Testergebnisse der Testentscheide unter Verwendung der der Bonferroni-Korrektur dargestellt.

Tabelle 4.5: Testergebnisse ($\alpha_g = 5\%$) (in Anl. an Wiegmann et al., 2017)

H.-Nr.	Var. 1	Var. 2	Test	p	Testentscheid
1	t ₁₁	t ₁₂	t-Test	0,000...	H ₀ ablehnen
2	t ₂₁	t ₂₂	t-Test	0,000...	H ₀ ablehnen
3	t ₃₁	t ₃₂	t-Test	0,000...	H ₀ ablehnen
4	t ₄₁	t ₄₂	t-Test	0,000...	H ₀ ablehnen
5	t ₅₁	t ₅₂	t-Test	0,000...	H ₀ ablehnen
6	t ₆₁	t ₆₂	t-Test	0,0005	H ₀ ablehnen
7	t ₇₁	t ₇₂	t-Test	0,000...	H ₀ ablehnen
8	g ₁₁	g ₁₂	Wilcoxon	0,032	H ₀ beibehalten
9	g ₂₁	g ₂₂	Wilcoxon	0,003	H ₀ beibehalten
10	g ₃₁	g ₃₂	Wilcoxon	0,15	H ₀ beibehalten
11	g ₄₁	g ₄₂	Wilcoxon	0,3415	H ₀ beibehalten
12	g ₅₁	g ₅₂	Wilcoxon	0,2165	H ₀ beibehalten
13	g ₆₁	g ₆₂	Wilcoxon	0,2755	H ₀ beibehalten
14	g ₇₁	g ₇₂	Wilcoxon	0,024	H ₀ beibehalten
15	z ₁₁	z ₁₂	Wilcoxon	0,006	H ₀ beibehalten
16	z ₂₁	z ₂₂	Wilcoxon	0,002	H ₀ ablehnen
17	z ₃₁	z ₃₂	Wilcoxon	0,0225	H ₀ beibehalten
18	z ₄₁	z ₄₂	Wilcoxon	0,022	H ₀ beibehalten
19	z ₅₁	z ₅₂	Wilcoxon	0,04	H ₀ beibehalten
20	z ₆₁	z ₆₂	Wilcoxon	0,0455	H ₀ beibehalten
21	z ₇₁	z ₇₂	Wilcoxon	0,0615	H ₀ beibehalten

Die Testergebnisse zeigen, dass die Teilnehmer mit dem *Human Input Device*, entlang der gesamten Lernkurve, signifikant schneller waren als mit der Maus. Obwohl die Teilnehmer im Mittel in der Stichprobe mit dem *Human Input Device* zudem auch genauer und zufriedener waren als mit der Maus, konnte nicht gezeigt werden, dass dieser unterschied signifikant ist. Lediglich im zweiten Durchlauf waren die Teilnehmer bei der Bedienung mit dem *Human Input Device* signifikant zufriedener als bei der Maus.

4.2.4 Fazit der ersten Nutzerstudie

Die Testergebnisse zeigen, dass die Nullhypothesen der Nr. 1-7 abgelehnt wurden. Somit gelten bei einem Gesamtsignifikanzniveau von 5% hier die entsprechenden

Alternativhypothesen. Aus Gründen der Übersicht werden die Hypothesen an dieser Stelle erneut dargestellt.

$$1. H_0: \mu_{t_{12}} \geq \mu_{t_{11}} \text{ gegen } H_1: \mu_{t_{12}} < \mu_{t_{11}}$$

$$2. H_0: \mu_{t_{22}} \geq \mu_{t_{11}} \text{ gegen } H_1: \mu_{t_{22}} < \mu_{t_{11}}$$

$$\vdots$$

$$8. H_0: \mu_{g_{12}} \geq \mu_{g_{11}} \text{ gegen } H_1: \mu_{g_{12}} < \mu_{g_{11}}$$

$$9. H_0: \mu_{g_{22}} \geq \mu_{g_{11}} \text{ gegen } H_1: \mu_{g_{22}} < \mu_{g_{11}}$$

$$\vdots$$

$$15. H_0: \mu_{z_{12}} \leq \mu_{t_{11}} \text{ gegen } H_1: \mu_{z_{12}} > \mu_{t_{11}}$$

$$16. H_0: \mu_{z_{22}} \leq \mu_{t_{11}} \text{ gegen } H_1: \mu_{z_{22}} > \mu_{t_{11}}$$

$$\vdots$$

Die Alternativhypothesen geben eindeutig wieder, dass die Teilnehmer im Mittel mit dem *Human Input Device* weniger Zeit benötigt haben, also schneller sind. Bei den Variablen für die Genauigkeit (Hypothesen Nr. 8-14) und der Zufriedenstellung (Hypothesen Nr.15-21) bleiben bis auf Hypothese Nr.16 die Nullhypothesen bestehen. Diese sagen aus, die Genauigkeit bzw. Zufriedenstellung, die mit dem *Human Input Device* erzielt wurde, geringer oder gleichwertig zu den Ergebnissen ist, die mit der Maus erzielt wurden. Es bleibt also bei diesen beiden Größen bei einem ambivalenten Ergebnis. Was bedeutet dieses Ergebnis für den Vergleich der Gebrauchstauglichkeit bei der Ergonomiesimulation? In der ISO 9241-11 wird lediglich beschrieben, dass die Gebrauchstauglichkeit über die drei Größen Effektivität, Effizienz und Zufriedenstellung gemessen wird. Man könnte nun eindeutig sagen, dass ein Produkt eine höhere Gebrauchstauglichkeit aufweisen würde als ein anderes, wenn eine dieser Größen höher ist als beim anderen und die anderen beiden Größen mindestens gleichwertig sind. Die ISO 9241-11 gibt allerdings nicht an, inwiefern die Gebrauchstauglichkeit zweier Produkte verglichen werden kann, wenn eine Größe bei einem Produkt größer ist und eine andere geringer ist. Aufgrund der mehrdeutigen Testergebnisse kann Letzteres in diesem Fall nicht ausgeschlossen werden. Es kann demnach letzten Endes nicht eindeutig schlussgefolgert werden, dass die Gebrauchstauglichkeit des *Human Input Device* bei der Ergonomiesimulation höher ist als die der Maus. Was jedoch eindeutig gezeigt werden konnte ist, dass die Teilnehmer für die Einstellung der Körperhaltung signifikant weniger Zeit benötigten. Da der hohe Zeitbedarf für die Erstellung von Ergonomiesimulation der größte Nachteil und somit auch das Haupthemmnis zur vermehrten Anwendung dessen darstellt

(siehe Unterabschnitt 2.2.5), lässt sich trotzdem schlussfolgern, dass die Anwendung des *Human Input Device* bei der Ergonomiesimulation sinnvoll sein kann.

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Studie mit einer konstanten, begrenzten Menge an Zielposen durchgeführt wurde. Es gilt zu vermuten, dass die Zielpose einen Einfluss auf die einzelnen Komponenten der Gebrauchstauglichkeit der unterschiedlichen Eingabegeräte hat. Beispielsweise ist es möglich, dass bestimmte Zielposen mit der Maus schneller erreicht werden können als mit dem *Human Input Device*. Aus diesem Grund wurden mehrere Zielposen ausgewählt, mit dem Ziel, dass sich mögliche Effekte auf die Gebrauchstauglichkeit ausgleichen. Bei der begrenzten Anzahl an Zielposen lässt sich eine mögliche Bevor- oder Benachteiligung jedoch nicht gänzlich ausschließen. Ebenfalls gilt es zu beachten, dass die Studie mit Laien und nicht mit Endanwendern durchgeführt wurde. Eine Übertragung der Ergebnisse auf den Endanwenderkreis ist somit mit gewissen Unsicherheiten behaftet. Darüber hinaus muss berücksichtigt werden, dass die Lernkurve mit den sechs direkt hintereinander liegenden Durchläufen und dem siebten mit zeitlichem Abstand begrenzt abgebildet wurde. Möglicherweise zeigen längerfristige Effekte erst später Wirkung und wurden hier nicht erfasst.

4.3 Nutzerstudie zur eingebetteten Anwendung des Human Input Device bei der Ergonomiesimulation

Nachdem in der ersten Studie die isolierte Gebrauchstauglichkeit bei der Manipulation der Körperhaltung von Menschmodellen betrachtet wurde, soll diese Studie die Anwendung des *Human Input Device* bei der Erstellung von Bewegungen in der Ergonomiesimulation im Vergleich zur Maus evaluieren. Dabei soll auf die Erfahrung von Experten zurückgegriffen werden. Konkret soll bei der Nutzerstudie folgende Fragestellung beantwortet werden:

Schätzen (Domänen)-Experten die Gebrauchstauglichkeit des Human Input Device bei der Erstellung von Bewegungen in der Ergonomiesimulation höher ein als die Maus-basierte Benutzungsschnittstelle?

4.3.1 Studiendesign

Als Methode zur Beantwortung dieser Frage wird die Evaluation mittels eines Fragebogens gewählt. Basis der Bewertung stellt die Vorstellung der unterschiedlichen Möglichkeiten zur Generierung von Bewegungen des Menschmodells anhand eines Szenarios dar. Im Folgenden soll neben dem Aufbau des Szenarios, die Teilnehmer und der Aufbau des Fragebogens beschrieben werden.

Aufbau des Szenarios

Für die Studie wurde ein Szenario aufbereitet, an dem die Experten die Erstellung der Simulation mit Methoden der Maus und der Tastatur durchführen konnten. Das Szenario wurde aus einem konkreten Einsatzfall in der Automobilindustrie abgeleitet. Dabei geht es um den Vorgang des Aufnehmens eines Lenkgetriebes und das Ablegen auf einem Werkstückträger auf einem Fördersystem. In der Praxis wird diese Tätigkeit mit einem Manipulator durchgeführt. In dieser Studie soll die Auswirkung auf die Bewegung untersucht werden, wenn das Lenkgetriebe manuell ohne eine Hebehilfe entnommen und abgelegt wird.

Die Nutzerstudie wird wie die vorangegangene Studie mit *Process Simulate* durchgeführt. Die 3D-Daten wurden dazu „sinngemäß“ nachmodelliert, sodass ein aus ergonomischer Sicht analoges 3D-Abbild vorhanden ist. Wettbewerbsrelevante Details über das Produkt oder die Betriebsmittel sind jedoch nicht mehr nachvollziehbar. Die aufbereitete 3D-Szene aus *Process Simulate* ist in Abbildung 4.15 dargestellt. Die Lenkgetriebe sind in mehreren Lagen in einem Sonderbehälter angeordnet. In der Szene ist die untere Ebene mit Lenkgetrieben belegt. Vom Fördersystem wurde nur der für den Vorgang relevante Abschnitt dargestellt. Auf diesem Abschnitt ist ein Werkstückträger mit Aufnahmen für das Lenkgetriebe angeordnet. Ebenfalls wurde in die Szene ein Menschmodell erstellt, dass anthropometrisch das 50. Perzentil der deutschen Bevölkerung entspricht.

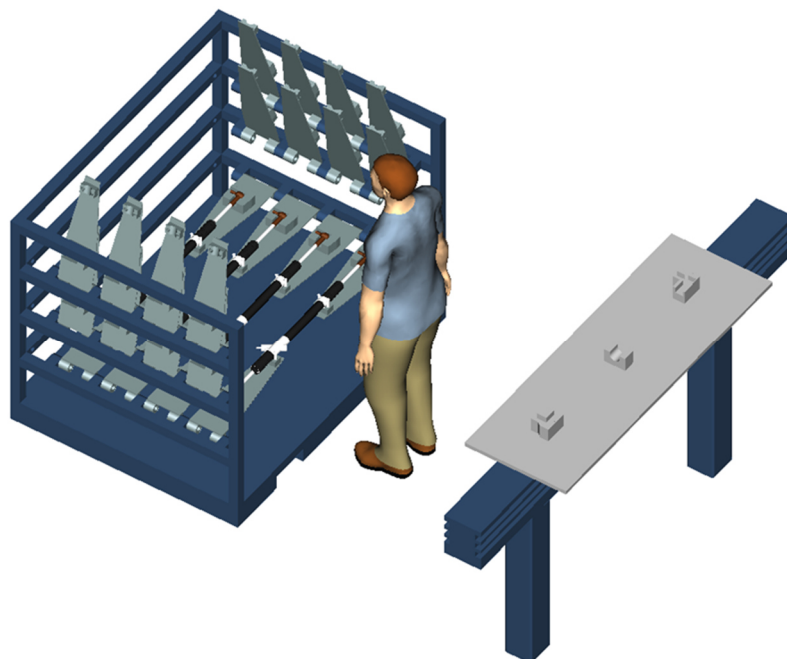


Abbildung 4.15: Ausgangssituation des Szenarios

Auf Basis der Szene können die Teilnehmer nun ggf. unter Anleitung die verschiedenen Methoden zur Generierung von Bewegungen ausführen. Konkret stehen dabei folgende Möglichkeiten zur Verfügung:

- Bewegungsgenerierung auf Basis des Keyframing-Ansatzes und inverser Kinematik sowie der Maus als Eingabegerät
- Bewegungsgenerierung auf Basis des Keyframing-Ansatzes und Vorwärtskinematik sowie der Maus als Eingabegerät
- Bewegungsgenerierung auf Basis des Keyframing-Ansatzes und Vorwärtskinematik sowie des *Human Input Device* als Eingabegerät
- Aufgabenbasierte Bewegungsgenerierung mit der Maus als Eingabegerät

Teilnehmer

Teilnehmer der Studie sind Domänenexperten auf dem Gebiet der Arbeitsplanung und Ergonomiesimulation aus der Praxis. Entgegen dem ersten Versuch sind sie in der Lage, die ergonomisch relevante Genauigkeit der verschiedenen Verfahren, sowie deren Verhältnis von Aufwand zu Nutzen zu beurteilen. Insgesamt nehmen elf Teilnehmer im Alter von 27 bis 45 Jahren an der Studie teil. Fünf Teilnehmer sind dabei weiblichen und sechs männlichen Geschlechts.

Aufbau des Fragebogens

Nachdem die Teilnehmer auf Basis des Szenarios die unterschiedlichen Methoden zur Generierung von Bewegungen kennengelernt haben, sollen diese einen Fragebogen ausfüllen.

Zunächst werden nach einer Einleitung kurz Alter, Geschlecht und berufliche Tätigkeit des jeweiligen Teilnehmers erfasst. Anschließend sollen die Teilnehmer drei Aussagen auf Basis einer Ratingskala bewerten. Über diese Aussagen sollen dabei die Teilnehmer die drei Komponenten der Gebrauchstauglichkeit im Vergleich zur Maus bewerten. In diesem Fragebogen werden die fünf Abstufungen⁹ *völlig falsch*, *ziemlich falsch*, *unentschieden*, *ziemlich richtig* oder *richtig* gewählt. Diese Art der Abstufung kann nach Rohrmann (1998, zit. nach Steiner & Benesch, 2015) als äquidistant angesehen werden. Es wird eine ungerade Anzahl an Abstufungen gewählt, damit die Teilnehmer die jeweilige Komponente der Gebrauchstauglichkeit zwischen Maus und *Human Input Device* auch als gleichwertig bewerten können.

⁹ . Raab-Steiner & Benesch (2015) geben an, dass es bei einer maximalen Abstufung von 5-7 zu keiner Überforderung der Teilnehmer kommt.

Konkret sollen die Teilnehmer folgende Aussagen bewerten:

1. *Im Allgemeinen lassen sich mit der **Maus** aus **ergonomischer Sicht genauere Simulationen** erstellen als mit dem *Human Input Device**
2. *Im Allgemeinen lässt sich mit der **Maus** bei der Durchführung von Ergonomiesimulationen ein **geringeres** Verhältnis von Aufwand zu Nutzen erzielen als mit dem *Human Input Device**
3. *Im Allgemeinen sind die Nutzer bei der Bedienung mit der **Maus zufriedener** als mit dem *Human Input Device**

Dabei bewerten die Teilnehmer mit der ersten Frage die Effektivität der Benutzungsschnittstellen im Vergleich. Hierbei ist noch einmal hervorgehoben, dass die Teilnehmer die Genauigkeit aus Sicht der Ergonomie beurteilen sollen. Sie bewerten also die ergonomisch relevante Genauigkeit. Im Gegensatz zur vorherigen Nutzerstudie, die mit Laien durchgeführt worden war, kann hier aufgrund der beruflichen Tätigkeit der Teilnehmer vorausgesetzt werden, dies zu beurteilen. Des Weiteren beginnt diese Frage sowie die beiden weiteren Aussagen mit den Worten „Im Allgemeinen“. Hierdurch wird die Bewertung nicht direkt auf das Anwendungsszenario gerichtet, sondern die Teilnehmer sollen die aus dem Beispiel gewonnen Erkenntnisse auf den allgemeinen Fall übertragen. Mit der zweiten Frage sollen die Teilnehmer die Effizienz der Eingabegeräte bewerten. Diese wurde für die Domänenexperten der Arbeitsplanung und -gestaltung verständlicher als Verhältnis von Aufwand zu Nutzen bezeichnet. Dabei bedeutet grundsätzlich ein geringes Verhältnis von Aufwand zu Nutzen eine hohe Effizienz. Die dritte Frage betrachtet die letzte Komponente, die subjektive Zufriedenstellung der Teilnehmer.

Nach Steiner & Benesch (Steiner & Benesch, 2016) können bei der Bewertung von Fragebögen durch die Teilnehmer unterschiedliche Phänomene negative Antworttendenzen hervorrufen. Davon wurden bei der Gestaltung folgende beeinflussbare bzw. relevante Tendenzen berücksichtigt.

- Ja-Sage-Bereitschaft

Im Allgemeinen besteht die Tendenz, dass Teilnehmer Fragen unabhängig vom Inhalt eher mit „Ja“ beantworten. Deshalb wurden die Fragen derart gestellt, dass eine Zustimmung der Aussage bedeutet, dass die Maus-basierte Schnittstelle der des *Human Input Devices* überlegen ist. Der Effekt begünstigt also die Maus basierte Schnittstelle und benachteiligt das *Human Input Device*

- Tendenz zur ersten passenden Kategorie

Dies bedeutet in diesem Fall, dass die Teilnehmer die Auswahlmöglichkeiten von links nach rechts lesen und bevorzugt die linksstehenden Antworten, unabhängig vom Inhalt, tendenziell bevorzugen. Auch hier wurde der Fragebogen derart konstruiert, dass dieser Effekt die Maus basierte Schnittstelle bevorzugt. Hierzu wurden die Auswahlmöglichkeiten von links beginnend mit *völlig richtig* bis rechts endend mit *völlig falsch* angeordnet.

- Mustermalen, Beeinflussung durch motivationale Bedingungen und Verfälschung aufgrund einer raschen Bearbeitung des Tests

Um diese drei Effekte abzufedern, wurde der Fragebogen bewusst kurz gestaltet, sodass die Teilnehmer sich für die Beantwortung jeder Frage Zeit lassen können und die Bearbeitungsdauer trotzdem relativ kurzgehalten wird.

Hypothesenformulierung

Mit der Studie sollen folgende Hypothesen überprüft werden:

1. Der Median der eingeschätzten Effektivität m_{Et} ist kleiner oder gleich *unentschieden*

$$H_0: m_{Et} \leq \text{unentschieden} \quad \text{gegen} \quad H_1: m_{Et} > \text{unentschieden}$$

2. Der Median der eingeschätzten Effizienz m_{Ez} ist kleiner oder gleich *unentschieden*

$$H_0: m_{Ez} \leq \text{unentschieden} \quad \text{gegen} \quad H_1: m_{Ez} > \text{unentschieden}$$

3. Der Median der eingeschätzten Zufriedenstellung m_Z ist kleiner oder gleich *unentschieden*

$$H_0: m_Z \leq \text{unentschieden} \quad \text{gegen} \quad H_1: m_Z > \text{unentschieden}$$

4.3.2 Studiendurchführung

Die Durchführung erfolgte an den regulären Arbeitsplätzen der Teilnehmer. Durchgeführt wurde die Simulation an einem dazu mitgebrachten Laptop und einem zusätzlichen Monitor. Ähnlich wie bei der ersten Nutzerstudie wurde auf dem Bildschirm des Monitors die Fenster für die Bedienung und Manipulation des Menschmodells über die Maus und auf dem separaten Monitor die 3D-Ansicht dargestellt. Die Versuche wurden mit der Version 12.1.3. von *Process Simulate* durchgeführt.

Den Teilnehmern wurden die verschiedenen Möglichkeiten aufgezeigt, mit denen die Bewegungsabläufe für den Arbeitsprozess definiert werden können. Dabei wurden den Teilnehmern zunächst grundlegend die Funktionen des Programms aufgezeigt, die Definitionen wurden schließlich durch die Teilnehmer festgelegt. Ausgegangen wird bei allen verschiedenen Methoden immer von der gleichen Ausgangssituation (Abbildung 4.15). Dabei

steht das Menschmodell direkt vor dem Behälter mit den Lenkgetrieben, um von dort ein Lenkgetriebe zu entnehmen, dann damit zum Werkstückträger auf den dem Fördersystem zu gehen und es auf diesem abzulegen.

Im Folgenden sollen die unterschiedlichen Methoden aufgezeigt werden, mit denen, ausgehend von der Ausgangssituation, der Bewegungsablauf definiert wurde. Der Übersicht halber werden die Methoden getrennt voneinander dargestellt. Während der Versuche wurden die verschiedenen Lösungswege, situativ abhängig, in unterschiedlicher Intensität betrachtet und ggf. kombiniert.

Keyframing auf Basis von inverser Kinematik und parametrischer Posengenerierung

Das Hinlangen zum Lenkgetriebe auf Basis von inverser Kinematik erfolgte mit dem Befehl *Auto Grasp* (Abbildung 4.16). Hierbei wurde die Pose parametrisch gebildet, indem das Lenkgetriebe als das zu greifende Objekt ausgewählt wird. Zusätzlich wurde noch die Griffrichtung (oben) und dass beidhändig nach dem Objekt gegriffen werden soll, angegeben. Das Menschmodell nahm dann, auf Basis dieser Eingaben, eine zum Lenkgetriebe hinlangende Körperhaltung ein. Da die Griffpositionen der Hände häufig nicht mit der gewünschten Position übereinstimmten, mussten diese manuell angepasst werden. Dies erfolgte, indem mithilfe eines eingeblendeten Achssystems per *Drag and Drop* die Position in die einzelnen Achsen verschoben wurde. Zusätzlich musste dabei die Haltung des Kopfes gesperrt werden, damit dieser nicht automatisch auf eine Hand ausgerichtet wurde, sondern zentral auf das Lenkgetriebe gerichtet blieb. Es entstand dann eine Körperhaltung, ähnlich zu jener aus Abbildung 4.16.

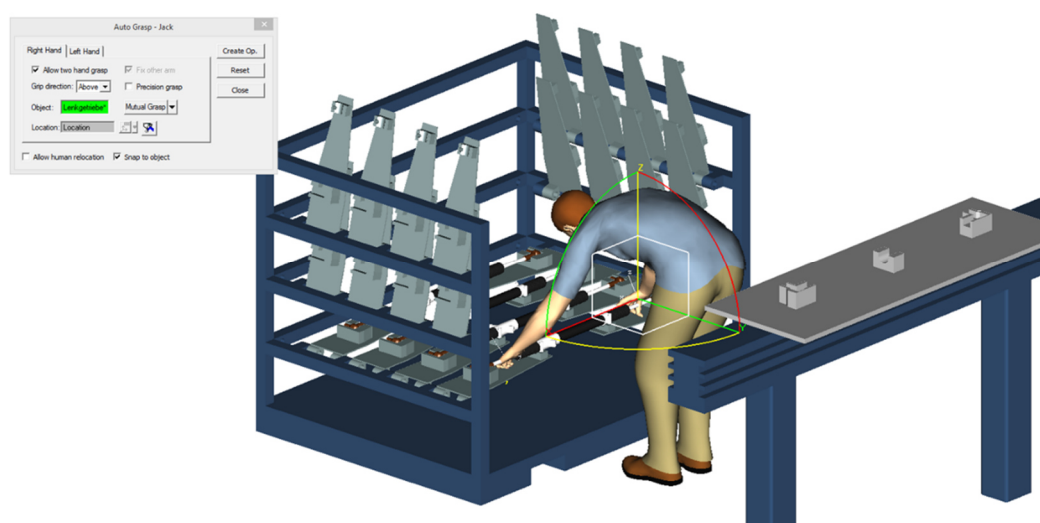


Abbildung 4.16: Hinlangen zum Lenkgetriebe über die Funktion *Auto Grasp*

Das Aufnehmen, Bringen und Platzieren des Lenkgetriebes über inverse Kinematik erfolgte mit dem Befehl *Place Objekt*. Dort konnten die Teilnehmer das Lenkgetriebe in Position und Orientierung verschieben. In Abhängigkeit zu diesem nahm das Menschmodell eine entsprechende Körperhaltung ein, nachdem als zu platzierendes Objekt das Lenkgetriebe ausgewählt und festgelegt wurde, dass Getragen werden soll. Die Zielposition und Orientierung wurde dann gespeichert, woraus eine Bewegung erzielt wurde. Insgesamt wurden drei Platzieroperationen erzeugt. Zunächst eine Platzierbewegung vor den Körper des Menschmodells, bei dem es sich aufrichtet (Abbildung 4.17, Szene 1). Hierbei wurde die Position des Menschmodells fixiert. Anschließend wurde das Lenkgetriebe vor dem Werkstückträger platziert, ebenfalls wurde festgelegt, dass das Menschmodell dabei dem Lenkgetriebe folgen soll, sodass das Menschmodell mit dem Lenkgetriebe zum Werkstückträger geht (Abbildung 4.17, Szene 2). Abschließend wurde das Lenkgetriebe in seine Endposition auf dem Werkstückträger platziert und die Position des Menschmodells fixiert (Abbildung 4.17, Szene 2).

An charakteristischen Szenen, aus denen dann eine Bewegung erzeugt wurde, wurde dann gespeichert. Diese und das Dialogfenster sind in Abbildung 4.17 dargestellt. Ebenfalls wurde als zu platzierendes Objekt das Lenkgetriebe ausgewählt.

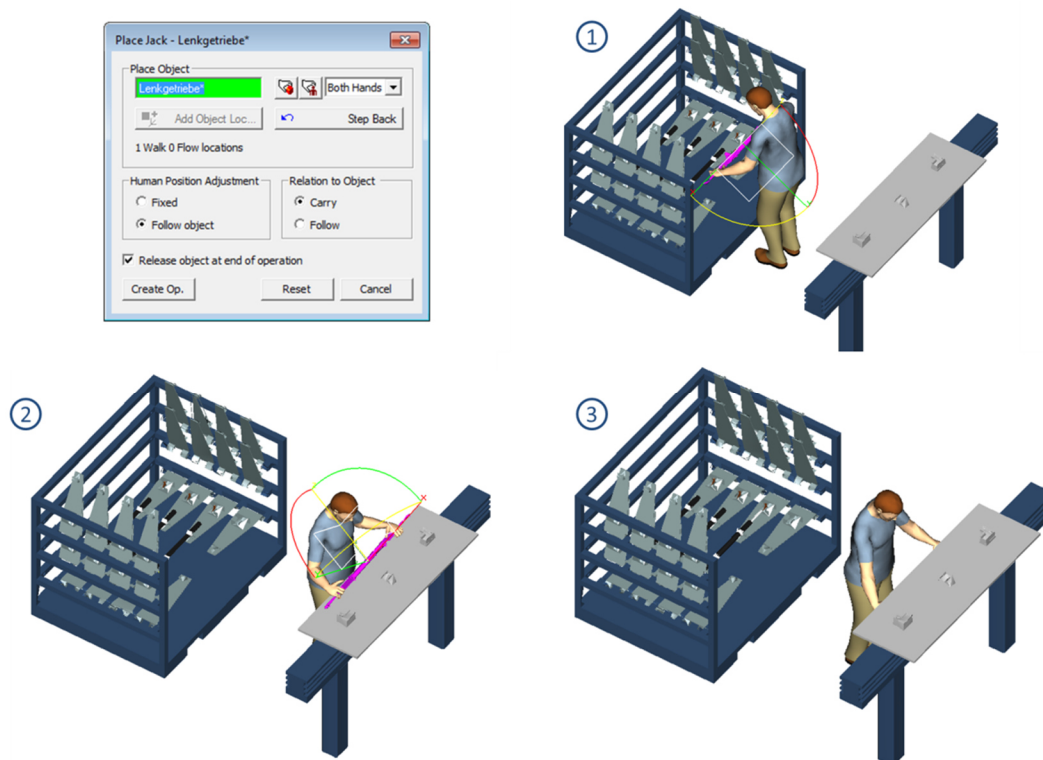


Abbildung 4.17: Dialogfenster und charakteristische Szenen zum Platzieren des Lenkgetriebes

Keyframing auf Basis von Vorwärtskinematik und Tastatur und Maus

Das Hinlangen zum Lenkgetriebe über Vorwärtskinematik erfolgte über das *Human Posturing* im Reiter *Adjust Joint*. Dort ließ sich dann jedes Gelenk bzw. jede Gelenkgruppe in allen Freiheitsgraden einstellen. Zusätzlich ließ sich die Position und Orientierung des Menschmodells über den *Placement Manipulator* verändern. Die Beugung für das Hinlangen zum Lenkgetriebe konnte dabei so definiert werden, dass sie aus dem Torso und den Beinen erfolgen konnte (Abbildung 4.18).

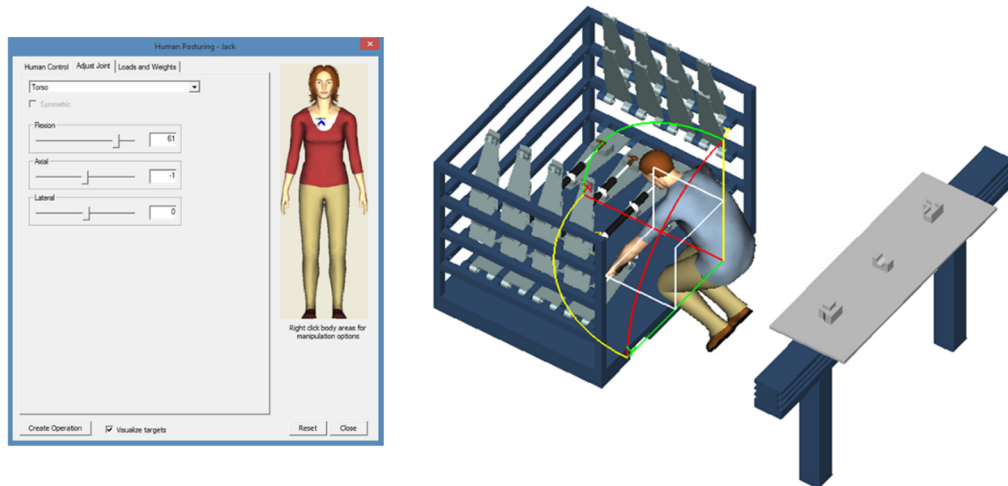


Abbildung 4.18: Hinlangen zum Lenkgetriebe über Vorwärtskinematik

Auf diese Art und Weise ließ sich dann auch die Aufnahmebewegung bzw. die Körperhaltung definieren (Abbildung 4.19, links). Damit das Lenkgetriebe dabei auch der Hand folgte, musste dies zudem noch in einem *Human Event* definiert werden. Die folgende Gehbewegung ließe sich zwar theoretisch über den Keyframing-Ansatz in Verbindung mit der Vorwärtskinematik durchführen. Aufgrund des sehr hohen Aufwandes spielt diese Möglichkeit in der Praxis jedoch keine Rolle. Aus diesem Grund wurde die Gehbewegung parametrisch über den *Walk Creator* erstellt (Abbildung 4.19, rechts). Dabei wurde die Zielposition definiert und festgelegt, dass die Arme beim Gehen fixiert werden sollen.

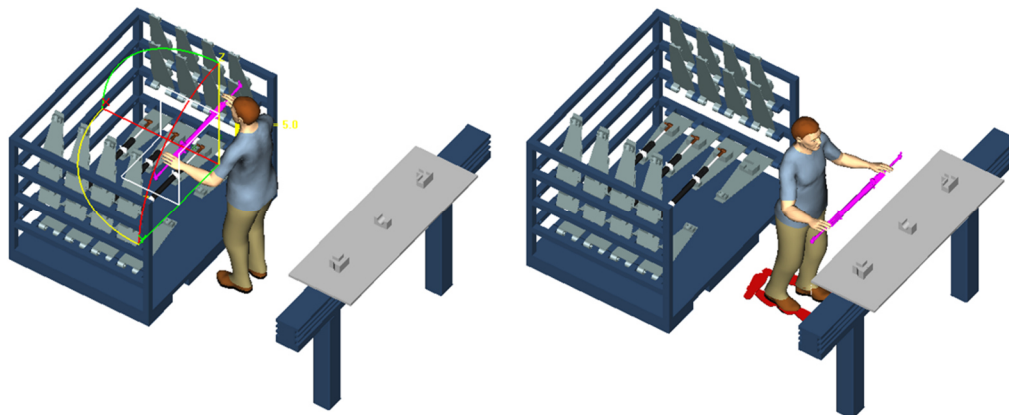


Abbildung 4.19: Pose zur Aufnahme des Lenkgetriebes (links), Gehbewegung über *Walk Creator* (rechts)

Abschließend erfolgte die Definition der Zielpose zum Ablegen, die erneut, wie schon beim Hinlangen, über *Adjust Joint* durchgeführt wurde. Dort wurde dann die Zielpose, wie sie z.B. in Abbildung 4.20 dargestellt ist, festgelegt sowie ggf. noch Zwischenposen zur Kollisionsvermeidung.

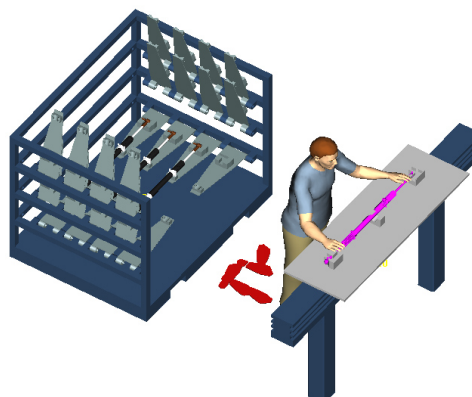


Abbildung 4.20: Zielpose zum Ablegen des Lenkgetriebes

Keyframing auf Basis von Vorwärtskinematik und dem *Human Input Device*

Die Generierung von Bewegungen auf Basis von Vorwärtskinematik und des *Human Input Device* und dem Keyframing-Ansatz erfolgte prinzipiell analog zur Bewegungsgenerierung über Vorwärtskinematik mit der Maus und Tastatur. Lediglich die Eingabe der Winkelkonfiguration für die Körperhaltung erfolgte mit dem *Human Input Device*. Die globale Position des Menschmodells erfolgte mit dem *Placement Manipulator* und die Winkel der Handgelenke wurden im *Human Posturing* über Vorwärtskinematik eingestellt.

Aufgabenbasierte Bewegungsgenerierung

Die aufgabenbasierte Bewegungsgenerierung des Menschmodells erfolgte in *Process Simulate* über den *Task Simulation Builder*. Um zunächst zum Lenkgetriebe hinzulangen, wurde ein *Get Task* angelegt. Dabei wurde nur das zu greifende Objekt festgelegt und dass automatisch

ermittelt werden sollte, ob mit der linken, der rechten oder beiden Händen zum Objekt hingelangt werden sollte (Abbildung 4.21, links). Nach Bestätigung des Dialogs erfolgte direkt eine Animation der Bewegung. Die Zielpose dazu ist in Abbildung 4.21 (rechts) dargestellt. Diese Zielpose konnte anschließend noch über Vorwärts- oder inverser Kinematik angepasst werden. Ebenfalls ist es möglich über diese Methoden eine oder mehrere Zwischenposen zu definieren, die das Menschmodell während der Bewegung einnehmen soll.

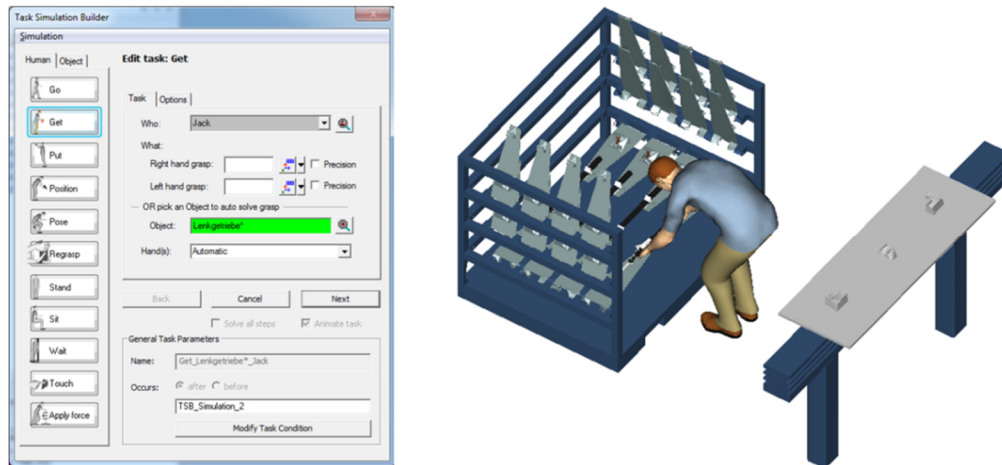


Abbildung 4.21: Hinlangen zum Lenkgetriebe mit dem *Task Simulation Builder*

Im nächsten Schritt wurde ein *Put Task* angelegt. Hierbei wurde das abzulegende Lenkgetriebe ausgewählt und über den *Placement Manipulator* in die gewünschte Zielposition und -orientierung verschoben. Die Hände des *Jack-Modells* wurden dann am Lenkgetriebe eingeblendet (Abbildung 4.22).

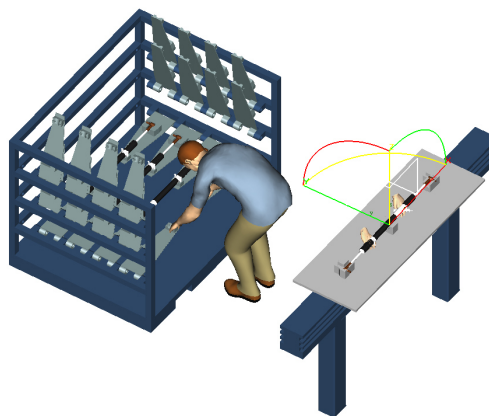


Abbildung 4.22: Anlegen des *Put Task* zum Ablegen des Lenkgetriebes.

Anschließend wurde, auf Basis der Ablageposition, eine Gehoperation erstellt, dessen Endposition noch verändert werden konnte. In diesem Beispiel ist diese relativ dicht beim Werkstückträger. In Abbildung 4.23 links ist die Zielposition in grün im Vergleich zu einer korrigierten Position dargestellt. Auf Basis der Endposition und der Ablageposition und –

orientierung des Lenkgetriebes wurde dann die Ablageoperation erstellt. Die Zielpose des Ablagevorgangs ist in Abbildung 4.23 rechts aufgezeigt. Die Zielpose konnte im Anschluss, über die bereits aufgezeigten Methoden der inversen oder Vorwärtskinematik, manipuliert werden. Ebenfalls können, wie beim *Get Task*, noch Zwischenposen eingefügt werden.

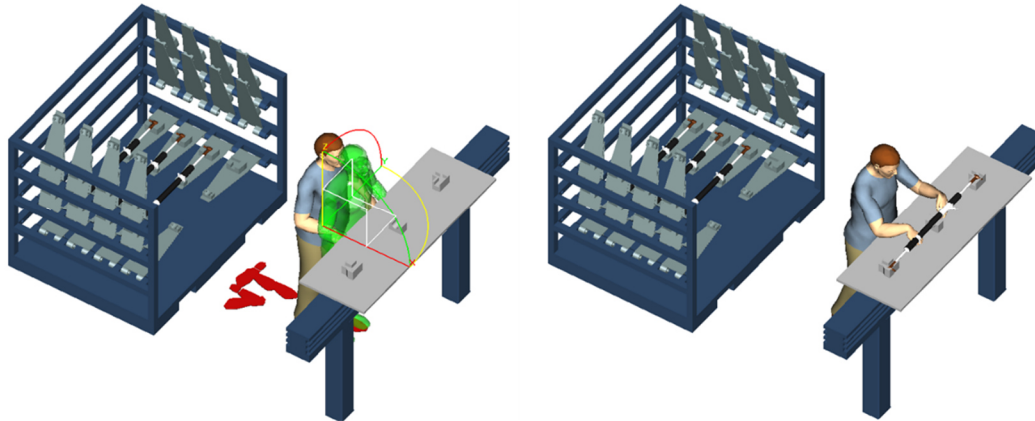


Abbildung 4.23: Korrigierte Endposition der Gehoperation und Zielpose bei der Ablage des Lenkgetriebes

4.3.3 Studiauswertung

Neben der quantitativ über den Fragebogen erhobenen und in 4.3.1 beschriebenen Maße der Evaluation, konnten auch qualitative Beobachtungen während der Durchführung erhoben werden. Im Folgenden werden zunächst diese Beobachtungen, klassifiziert nach der Art der Manipulationsfunktionen bzw. der Bewegungsgenerierung, beschrieben. Anschließend erfolgt die Beschreibung und Auswertung der quantitativ erhobenen Daten.

Beobachtungen während der Versuchsdurchführung

Beobachtung bei inverser Kinematik

Die Teilnehmer waren häufig nicht zufrieden mit der Körperhaltung bei der Entnahme des Lenkgetriebes, da die Beugung des Menschmodells beim Hinlangen aus dem Rücken erfolgte. Der Konsens der Teilnehmer ergab, dass es aus ergonomischen Gründen günstiger sei, dass das Menschmodell in die Knie gehen soll, bei einer möglichst geraden Haltung des Rückens. Die Umsetzung einer solchen Pose über die Befehle des *Auto Grasp* oder über die inverse Kinematik war den Teilnehmern nicht möglich.

Beim Ablegen des Lenkgetriebes kam es häufig zu einer Kollision zwischen Werkstückträger, Menschmodell und Lenkgetriebe. Exemplarisch zeigt dies (Abbildung 4.24) auf.

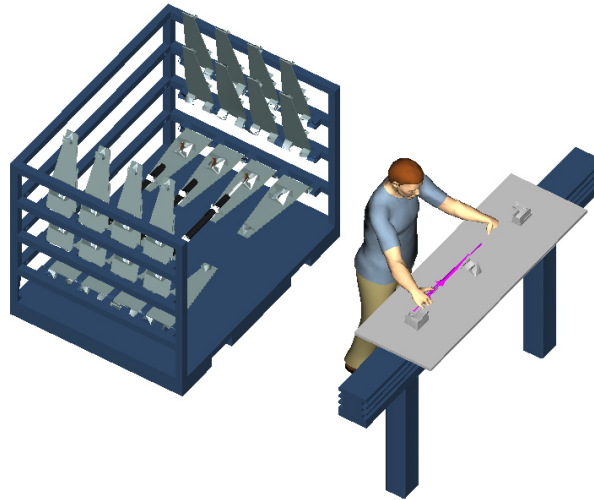


Abbildung 4.24: Kollision zwischen Werkstückträgern, Lenkgetriebe und Menschmodell bei Bewegungsgenerierung durch inverse Kinematik

Beobachtungen bei aufgabenbasierte Bewegungsgenerierung

Genau wie bei der Definition über inverse Kinematik erfolgte bei der Entnahme des Lenkgetriebes die Beugung aus dem Rücken. Eine Anpassung der Pose war nur über Vorwärtskinematik möglich. Beim Ablegen des Lenkgetriebes kommt es zunächst, ebenfalls wie bei der Bewegungsgenerierung, über inverse Kinematik zur Kollision zwischen Lenkgetriebe, Menschmodell und Werkstückträger, die relativ aufwändig über Modellierung von End- und Zwischenpose verhindert werden muss (Abbildung 4.25).

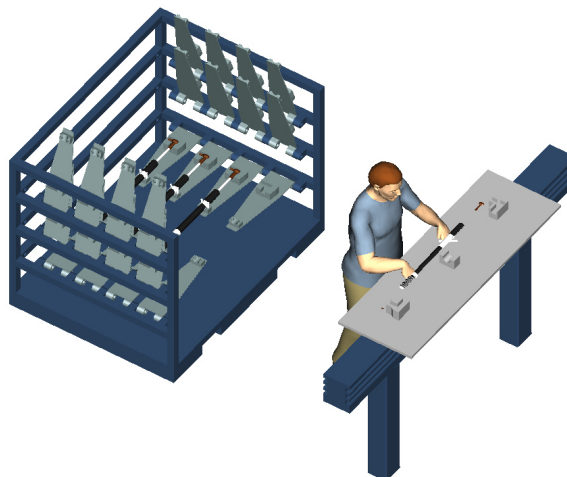


Abbildung 4.25: Kollision zwischen Werkstückträgern, Lenkgetriebe und Menschmodell bei parametrischer Bewegungsgenerierung

Beobachtungen zur Vorwärtskinematik mit Maus und Tastatur

Die Teilnehmer hatten teilweise Schwierigkeiten beim Einstellen der Freiheitsgrade, weil für sie die Zuordnung zwischen den Freiheitsgraden des Dialogfensters und des Menschmodells

nicht eindeutig war. Die Konfiguration des Torsos lässt sich zum Beispiel über drei Freiheitsgrade einstellen. Die Steuerelemente zum Einstellen dieser Freiheitsgrade sind beschriftet mit den Bezeichnungen *Flexion*, *Axial* und *Lateral*. Hier war auch für Domänenexperten nicht immer intuitiv klar, welche Richtung jeweils gesteuert wird, sodass dies über Probieren ermittelt wurde, was den zeitlichen Aufwand erhöhte.

Beobachtungen zur Vorwärtskinematik mit Human Input Device

Durch den seriellen Aufbau der Schultergelenke hatten die Benutzer teilweise Schwierigkeiten, das Schultergelenk zu konfigurieren. Je nach Konfiguration war es notwendig Stellungen, die bei einem Kugelgelenk mit einer Bewegung durchgeführt werden können, über mehrere Bewegungen der Gelenke zu erreichen.

Quantitative Auswertung des Fragebogens

Deskriptive Beschreibung der Stichprobe

Die Verteilung der erfassten Bewertungen zu den Aussagen Nr.1-3 (siehe 4.3.1) zeigt Abbildung 4.26. Der Übersicht halber werden die Aussagen, die die Teilnehmer bewerten sollten, an dieser Stelle noch einmal dargestellt:

1. *Im Allgemeinen lassen sich mit der **Maus** aus **ergonomischer Sicht genauere Simulationen** erstellen als mit dem Human Input Device*
2. *Im Allgemeinen lässt sich mit der **Maus** bei der Durchführung von Ergonomiesimulationen ein **geringeres** Verhältnis von Aufwand zu Nutzen erzielen als mit dem Human Input Device*
3. *Im Allgemeinen sind die Nutzer bei der Bedienung mit der **Maus zufriedener** als mit dem Human Input Device*

Die Aussage Nr. 1 zur Beurteilung der Effektivität bewerteten dabei fünf Teilnehmer mit *ziemlich richtig* und schreiben damit der Maus eine höhere, ergonomisch relevante Genauigkeit im Vergleich zum *Human Input Device* zu. Auf der anderen Seite schätzen fünf Teilnehmer die Genauigkeit des *Human Input Device* höher ein, wobei vier Teilnehmer die Aussage mit *ziemlich falsch* und ein Teilnehmer *völlig falsch* bewerteten. Ein Teilnehmer bewertete den Vergleich der Effektivität mit *unentschieden*. Hinsichtlich der Stichprobe scheint es demnach, in Bezug auf die Einschätzung der Effektivität, zunächst keine Präferenz hinsichtlich Maus oder *Human Input Device* zu geben. Dies drückt sich auch im Median aus, der *unentschieden* beträgt.

Bei der Aussage Nr. 2, mit der die Teilnehmer die Effizienz, umschrieben mit dem Verhältnis von Aufwand zu Nutzen, bewerten sollten, zeigt sich ein anderes Bild. Lediglich ein Teilnehmer stimmte der Aussage mit *ziemlich richtig* zu, dass im Allgemeinen das Verhältnis von Aufwand zu Nutzen mit der Maus geringer ist als mit dem *Human Input Device*, was im Umkehrschluss bedeutet, dass die Effektivität mit der Maus höher ist. Fünf Teilnehmer hingegen bewerten die Aussage mit *ziemlich falsch* und vier Teilnehmer mit *völlig falsch*. Ein Teilnehmer bewertete die Aussage mit *unentschieden*. Der Median der Stichprobenverteilung zur Bewertung der zweiten Aussage beträgt *ziemlich falsch*. In der Stichprobe überwiegt also die Einschätzung, dass mit dem *Human Input Device* im Allgemeinen im Vergleich zur Maus eine höhere Effizienz erzielt wird.

Die Aussage Nr.3 zur Zufriedenstellung bewerteten die Teilnehmer folgendermaßen: Vier Teilnehmer bewerten die Aussage mit *ziemlich falsch* und zwei mit *völlig falsch*. Sie schätzen also ein, dass die Nutzer im Allgemein bei der Verwendung des *Human Input Device* zufriedener sind als mit der Maus. Fünf Teilnehmer bewerten die Aussage mit *unentschieden*. Der Median der Stichprobe zur Bewertung der Aussage Nr.3 beträgt *ziemlich falsch*. Überwiegend schätzten hier also die Teilnehmer ein, dass im Allgemeinen die Nutzer bei der Verwendung des *Human Input Device* zufriedener sind.



Abbildung 4.26: Bewertungsverteilung der Stichprobe zu den Aussagen Nr.1-3 des Fragebogens

Überprüfung der Hypothesen

Aus Gründen der Übersicht sollen die in 4.3.1 formulierten und nun zu überprüfenden Hypothesen an dieser Stelle noch einmal dargestellt werden.

1. Der Median der eingeschätzten Effektivität m_{Et} ist kleiner oder gleich *unentschieden*

$$H_0: m_{Et} \leq \text{unentschieden} \text{ gegen } H_1: m_{Et} > \text{unentschieden}$$

2. Der Median der eingeschätzten Effektivität m_{Ez} ist kleiner oder gleich *unentschieden*

$$H_0: m_{Ez} \leq \text{unentschieden} \text{ gegen } H_1: m_{Ez} > \text{unentschieden}$$

3. Der Median der eingeschätzten Zufriedenstellung m_Z ist kleiner oder gleich *unentschieden*

$$H_0: m_Z \leq \text{unentschieden} \text{ gegen } H_1: m_Z > \text{unentschieden}$$

Die Überprüfung der Hypothesen erfolgt mit dem Wilcoxon-Vorzeichenrangtest bei einer Stichprobe. Da, wie schon bei der ersten Nutzerstudie, durch die Überprüfung von drei Hypothesen multiple Hypothesentests durchgeführt werden, wird auch hier das Signifikanzniveau für die Einzeltests α_i über die Bonferroni-Korrektur bei einem Gesamtsignifikanzniveau α_g von 5% angepasst.

$$\alpha_i = \frac{\alpha_g}{k} = \frac{0,05}{3} \approx 0,0167$$

Die Tests wurden mithilfe der Software SPSS durchgeführt. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 4.6: Ergebnisse der Wilcoxon-Vorzeichenrangtests bei einer Stichprobe ($\alpha_g = 0,05$, $\alpha_i = 0,0167$)

Hyp.-Nr. i	Variable	p	Testentscheid
1	m_{Et}	0,391	H_0 beibehalten
2	m_{Ez}	0,006	H_0 ablehnen
3	m_Z	0,0115	H_0 ablehnen

Die Überprüfung der ersten Hypothese führte zur Beibehaltung der Nullhypothese bzw. zur Ablehnung der Alternativhypothese. Es konnte also nicht gezeigt werden, dass die Mehrheit der Experten einschätzen, dass im Allgemeinen mit dem *Human Input Device* genaueren Ergebnisse erzielt werden als mit der Maus als Eingabegerät. Demgegenüber führten die Tests dazu, dass die Nullhypothesen der zweiten und dritten Hypothese verworfen wurden. Demnach schätzt die Mehrheit der Experten ein, dass die Nutzer im Allgemeinen mit dem

Human Input Device bei der Ergonomiesimulation die Nutzer effizienter und zufriedener sind als mit der Maus.

4.3.4 Fazit der zweiten Nutzerstudie

Wie bereits bei der ersten Nutzerstudie ergibt die Überprüfung der Hypothesen ein ambivalentes Ergebnis. Bei der Überprüfung der Hypothese Nr. 1 wird die Nullhypothese beibehalten. Die eingeschätzte Effektivität des *Human Input Device* ist demnach kleiner oder gleich der eingeschätzten Effektivität, die mit der Maus erzielt wird. Auch wenn bei den Hypothesen Nr.2 und 3 durch Ablehnung der Nullhypothesen die eingeschätzte Effizienz und Zufriedenstellung bei der Verwendung des *Human Input Device* eindeutig höher ist, kann hier aus denselben Gründen, wie in Unterabschnitt 4.2.4, dargestellt nicht abschließend die Gebrauchstauglichkeit verglichen werden. Es kann jedoch analog dazu schlussgefolgert werden, dass mit dem *Human Input Device* durch die höher eingeschätzte Effizienz die Erstellungszeit von Ergonomiesimulation verkürzt werden kann. Somit könnte das *Human Input Device* dazu beitragen, dass die Ergonomiesimulation durchgehender Anwendung findet.

Bei der Beurteilung gilt es jedoch zu beachten, dass aus Gründen der zeitlichen Verfügbarkeit die Experten im begrenzten zeitlichen Rahmen das *Human Input Device* bedienen konnten. Auch war die Bedienung auf das beschriebene Szenario begrenzt. Des Weiteren wurden die Komponenten der Gebrauchstauglichkeit bei der Verwendung der unterschiedlichen Eingabegeräte nicht direkt gemessen, sondern die Experten mussten die Größen auf einen generellen Fall einschätzen. Hierzu ist festzuhalten, dass diese Einschätzung mit einer Unsicherheit behaftet ist.

5 Einsatzszenarien und Weiterentwicklungspotentiale

Im Folgenden wird zunächst beschrieben, wann der Einsatz des *Human Input Device* sinnvoll ist. Dies erfolgt dahingehend, dass zunächst abstrakt betrachtet wird, wie sich das Human Input Device bei den verschiedenen Methoden zur Bewegungsgenerierung verwenden lässt und wie es sich dadurch im Planungsprozess manueller Arbeitsplätze eingliedert. Anschließend wird dann die konkrete Verwendung des Human Input Device bei der Simulation manueller Arbeitsprozesse aufgezeigt, ehe abschließend Weiterentwicklungspotentiale aufgezeigt werden.

5.1 Einordnung des *Human Input Device* in den Planungsprozess und in die Methoden der Bewegungsgenerierung

In 2.2.4 wurden die grundlegenden Möglichkeiten der Bewegungsgenerierung für arbeitswissenschaftliche, digitale Menschmodelle dargestellt. Die Intention hinter der Entwicklung der Eingabepuppe ist dabei nicht, alle anderen Möglichkeiten gänzlich zu verdrängen, sondern vielmehr, dass sich die Anwendung der Puppe neben den übrigen Methoden einreihet. In diesem Abschnitt soll skizziert werden, wann die Benutzung der Eingabepuppe vorteilhaft ist. Abbildung 5.1 unterteilt zunächst grundsätzlich die Methoden zur Bewegungsgenerierung in Desktop-basierte-Methoden und in Motion-Capturing-Methoden. Wie sich diese beiden Methoden im Produktionsplanungsprozess ergänzen können, wird in Unterabschnitt 5.1.1 beschrieben. Mithilfe der Desktop-Methoden ist es möglich, Bewegungen aufgabenbasiert oder über den Keyframing-Ansatz zu generieren. Inwiefern sich dort die Verwendung der Eingabepuppe eingliedern lässt, zeigt 5.1.2. auf.

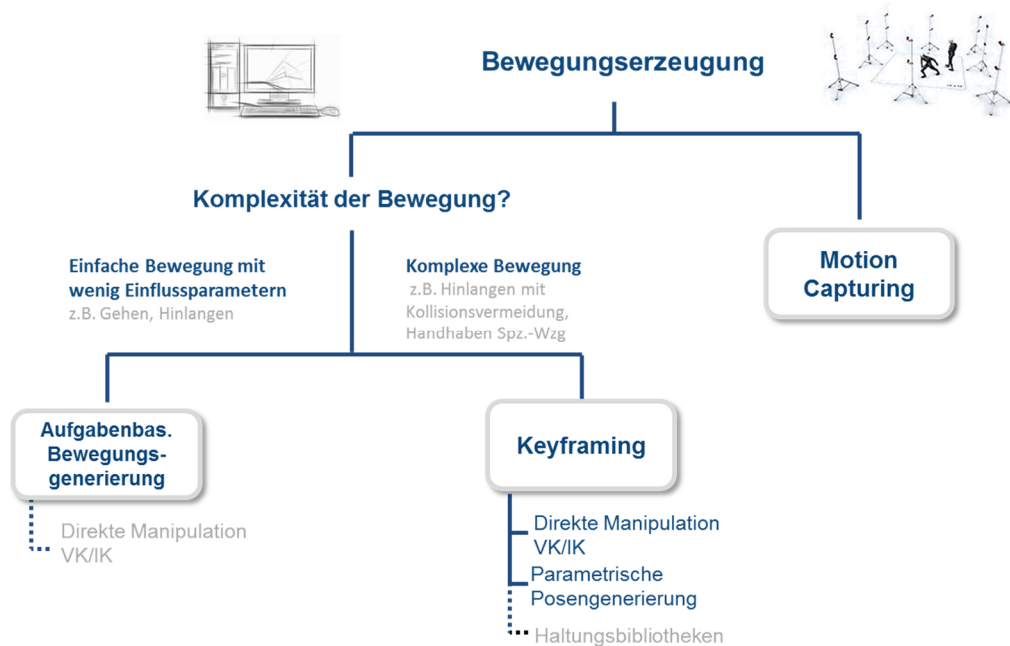


Abbildung 5.1: Möglichkeiten der Bewegungsgenerierung von arbeitswissenschaftlichen Menschmodellen

5.1.1 Desktop-Methoden vs. Motion Capturing

Dass sich die verschiedenen Desktop-Methoden und das Motion Capturing entlang des Produkt- und Produktionsplanungsprozesses sinnvoll ergänzen können, soll an dieser Stelle am Beispiel der Automobilindustrie aufgezeigt werden. In Abbildung 5.2 ist der Produktentwicklungsprozess der Automobilindustrie nach Göpfert und Schulz (Göpfert und Schulz, 2013) abgebildet. Dieser ist in die Unterprozesse Zieldefinition, Konzeptentwicklung, Serienentwicklung und Serienanlauf unterteilt. Ebenfalls ist qualitativ aufgezeigt wie groß in den jeweiligen Phasen die Einflussmöglichkeit auf das zukünftige Produkt und dessen Produktionsprozess ist. Grundsätzlich gilt, je früher Ansprüche und Änderungen aus arbeitswissenschaftlicher Sicht an das Produkt oder auf den Produktionsprozess und dessen Betriebsmittel geltend gemacht werden, desto größer sind deren Potenzial. Dies ist dadurch begründet, dass im Allgemeinen die Änderungskosten exponentiell mit zunehmender Produkt- und Prozessreife zunehmen (Jochem und Raffeld, 2014).

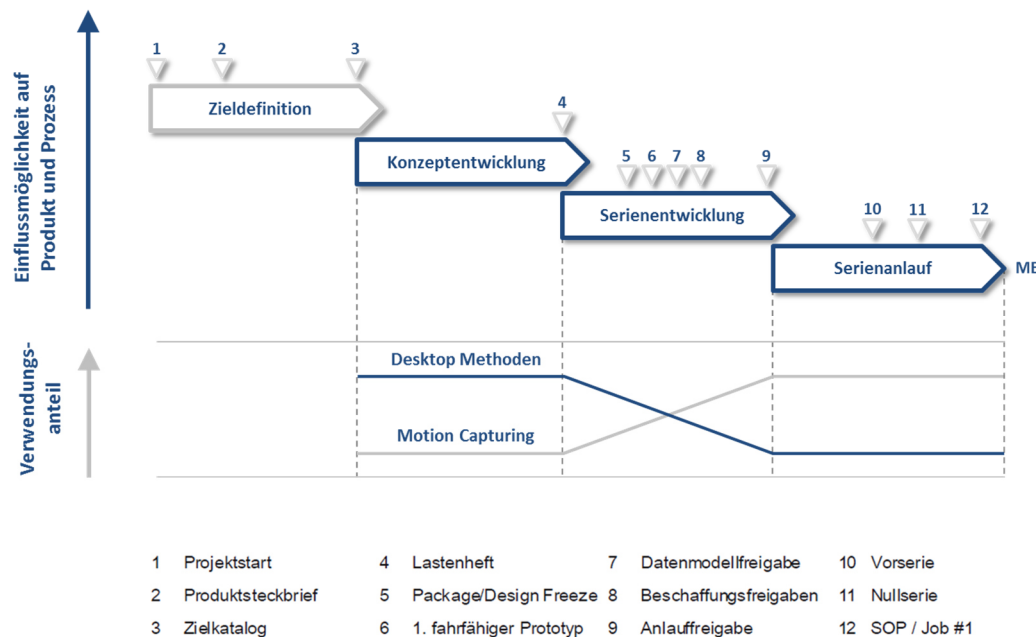


Abbildung 5.2: Ergonomiesimulation im Produktentwicklungsprozess der Automobilindustrie (in Anl. an Göpfert und Schulz, 2013)

Auf Basis von Ergonomiesimulation kann praktisch erst ab der Konzeptentwicklung des Produkts begonnen werden, Einfluss zu nehmen. Der Fokus liegt hierbei auf der Betrachtung des Produktes, da im Allgemeinen der Prozess und die Betriebsmittel noch sehr unscharf beschrieben sind. Denn dies setzt ja wiederum ein vollständig beschriebenes Produkt voraus. Die Möglichkeit der Einflussnahme auf das Produkt (und damit auch auf den Prozess) ist hier allerdings am größten, da bestenfalls lediglich das CAD-Modell des Produkts geändert werden muss. Solange sich dann die Kosten für das zukünftige Fahrzeug nicht erhöhen, müssen die Änderungen aus wirtschaftlicher Sicht auch keinen monetären Vorteil bringen.

Ab der Serienentwicklung, und hier insbesondere ab der Beschaffungsfreigabe, erhöht sich neben dem Produkt auch zunehmend der Reifegrad des Produktionsprozesses und dessen Betriebsmittel. Ab hier fallen in der Regel bereits erhöhte Änderungskosten für das Produkt an, da diese, je nach Fall, bereits Werkzeugänderungen o.Ä. nach sich ziehen kann. Aus rein wirtschaftlicher Sicht müssen die Änderungen dann einen monetären Vorteil bringen, wie etwa eine Einsparung der Fertigungszeit. Bei dieser Betrachtung fehlen rein ergonomischen Verbesserungen zukünftiger Arbeitsplätze oftmals die Gewichtung, da sich bisher konkrete Maßnahmen zur Verbesserung der Ergonomie nur schwer in Kosteneinsparungen ausdrücken lassen. Ob die Maßnahmen dann umgesetzt werden, hängt dann nicht mehr von wirtschaftlichen Gesichtspunkten ab, sondern etwa von der Unternehmenskultur, -Strategie und dem Einfluss der Arbeitnehmervertretung im Unternehmen. Demgegenüber ist der Einfluss in dieser Phase auf die Gestaltung der Betriebsmittel noch recht hoch, da hier die

Änderungskosten noch gering sind und Änderung ggf. nur am Datenmodell durchgeführt werden müssen.

Ab dem Serienanlauf besitzen Produkt- und dessen Produktionsprozesse, einschließlich Betriebsmittel, bereits eine hohe Reife, sodass im Regelfall nun auch Änderungskosten an den Betriebsmitteln anfallen. Somit müssen aus wirtschaftlicher Sicht deren Änderung auch hier einen monetären Vorteil bringen. Des Weiteren können Änderungen ggf. auch nicht mehr durchgeführt werden, da diese eine Änderung des Produktionsstarts nach sich führen könnten.

Eine Entscheidung darüber, welche Methode der Bewegungsgenerierung einzusetzen ist, hängt zum einen davon ab, wie valide diese Methode ist und zum anderen, wann sie eingesetzt werden. Es ist offensichtlich, dass eine Methode bevorzugt werden soll, die validere Ergebnisse erzielt. Ebenfalls lässt sich auf Basis der vorangegangenen Zeilen sagen, dass eine Methode bevorzugt werden soll, je früher diese eingesetzt werden kann. Beim Motion Capturing hängt die Validität u.a. von dem gewählten Verfahren ab und dessen Fehleranfälligkeit, von den durchführenden Probanden, sowie der Realitätsnähe des Versuchsaufbaus. Da die Bewegungen des digitalen Menschmodells direkt auf die Bewegung eines Menschen zurückzuführen sind, kann dem Motion Capturing prinzipbedingt eine hohe Validität zugesprochen werden. Hierfür werden allerdings möglichst seriennahe Prototypen von Produkt und Betriebsmittel benötigt, mit denen der Proband interagiert. Diese Prototypen sind allerdings häufig erst spät im Produktentwicklungsprozess verfügbar.

Bei den Desktop-Methoden sind ebenfalls das Verfahren, der Anwender und die Art der Bewegung für die Validität entscheidend. Wie valide Bewegungen sind, die mittels Keyframing-Verfahren durchgeführt werden, hängt rein vom Anwender ab. Er muss aus der Erfahrung heraus möglichst realistische Posen vorgeben, weshalb für aussagekräftige Ergebnisse dieses Verfahren zwingend von Experten angewandt werden muss. Die Validität von aufgabenbasierten bzw. parametrisch generierten Bewegungen, hängen von der Komplexität und der Anzahl der Randbedingungen ab. Je einfacher die Bewegung, desto größer ist die Validität (siehe Abbildung 2.24). Die Durchführung der Desktop-Methoden erfordert nur digitale Prototypen, sodass diese schon früh im Produktentwicklungsprozess durchgeführt werden können.

Inwiefern sich der Einsatz von Desktop- und Motion-Capturing-Verfahren über den Produktentwicklungsprozess ergänzen, zeigt qualitativ Abbildung 5.2 unten. Über den zeitlichen Verlauf des Produktentwicklungsprozesses ist dort der Verwendungsanteil der beiden Methoden zur Bewegungsgenerierung von digitalen Menschmodellen dargestellt. Demnach ist es sinnvoll, in der frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses Desktop-

Methoden zu verwenden, da es hier in dieser Phase große Einflussmöglichkeiten auf das Produkt und den Prozess gibt, aber die Verfügbarkeiten von Prototypen gering ist. Während der Serienentwicklung, in der die Verfügbarkeit von Prototypen steigt, ist es vorteilhaft, zunehmend Motion-Capturing-Verfahren anzuwenden, wo seriennahe Prototypen von Produkt- und Betriebsmittel vorliegen. Dies ist häufig in Produktionsvorbereitungswshops der Fall, in denen u.a. Vertreter der Werker, Produktions- und Arbeitsplanung sowie Qualitätssicherung die zukünftigen Arbeitsvorgänge an Prototypen abbilden. Hierbei können zum einen bereits Simulationen, die mit Desktop-Methoden erstellt wurden, mit einem Motion-Capturing-Verfahren zusätzlich überprüft und abgesichert werden. Zum anderen könnten dort Simulationen von Arbeitsplätzen erstellt werden, die bis dato nicht simuliert wurden. Während des Serienanlaufes laufen i.d.R. die Vor- und Nullserienfahrzeuge bereits über die Serienbetriebsmittel. Mögliche Änderungen oder Absicherungen gegenüber dem Stand des Produktionsvorbereitungswshops können dort direkt über Motion-Capturing-Verfahren durchgeführt werden.

5.1.2 Eingliederung der Eingabepuppe in die Desktop-Methoden zur Bewegungsgenerierung

Ausgehend von der in Abbildung 5.1 aufgezeigten Einordnung der verschiedenen Möglichkeiten der Bewegungserzeugung wurde im vorangegangenen Unterabschnitt skizziert, wie sich Desktop- und Motion-Capturing-Verfahren zur Bewegungsgenerierung entlang des Produktentwicklungsprozess ergänzen können.

In diesem Unterabschnitt soll nun die Verwendung des *Human Input Device* unter den Desktop-Verfahren beschrieben werden. Dies ist hauptsächlich der Fall bei der Bewegungsgenerierung über die Keyframing-Methode oder aber auch bei der Manipulation von Bewegungsbahnen über Zwischenposen (Abbildung 5.3).

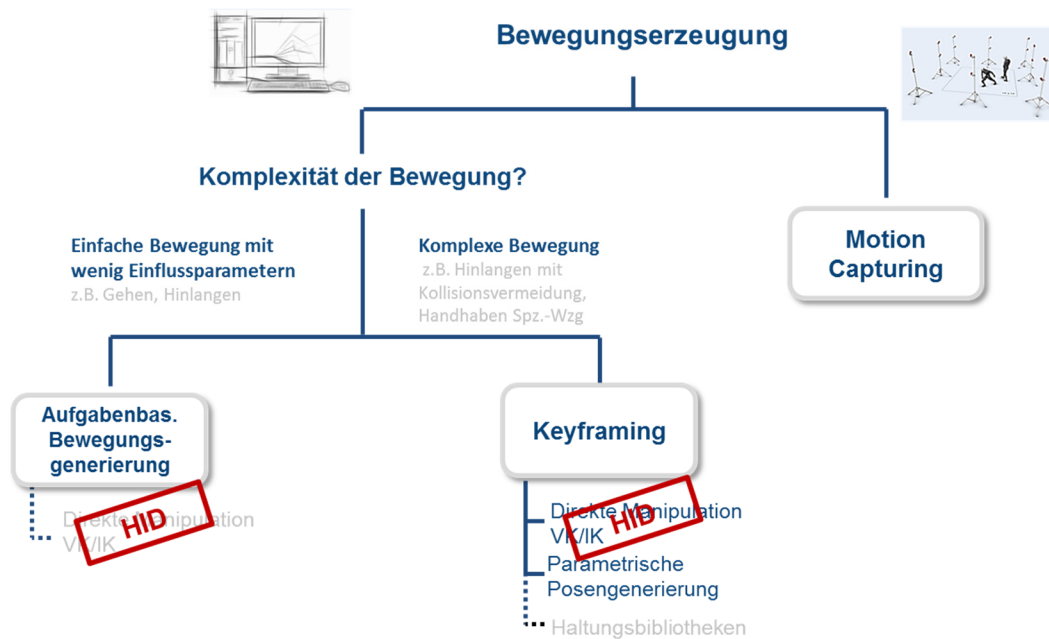


Abbildung 5.3: Anwendung der Eingabepuppe bei der Generierung von Bewegungen

Unter die Desktop-Verfahren fällt die Bewegungsgenerierung nach dem Keyframing-Ansatz und die parametrische bzw. die aufgabenbasierte Bewegungsgenerierung. Bei diesen Methoden lässt sich die Eingabepuppe überall dort integrieren, wo die Körperhaltung des Menschmodells direkt auf individuelle Einflüsse angepasst werden soll. Dabei kann sie anstelle der auf der mausbasierten, grafischen Benutzungsschnittstelle angewendet werden, bei der das Menschmodell über Vorwärts- oder inverser Kinematik geändert wird.

Der Einsatz der parametrischen Bewegungsgenerierung führt immer dann zu zufriedenstellenden Lösungen, wenn die Komplexität der Bewegung gering und von wenigen Parametern abhängig ist. Ein Beispiel hierfür ist die Generierung einer Gehbewegung, bei der der Benutzer lediglich einen Pfad vorgibt und noch wenige Parameter, wie etwa Schrittlänge o.Ä., vorgeben muss. Ein weiteres Beispiel stellt das Hinlangen zu einem Objekt ohne Berücksichtigung einer Kollisionsvermeidung dar. Prinzipiell ist es möglich, diese Bewegung noch an individuelle Einflüsse anzupassen. Hierzu kann über eine oder mehrere Zwischenposen der Bewegungsverlauf korrigiert werden. Abbildung 5.4 zeigt dies schematisch. Die parametrisch generierte Bewegung ohne Zwischenpose ist durch den zeitlichen Verlauf dreier Gelenkwinkel q_1 , q_2 und q_3 bestimmt. Durch die Definition einer Zwischenpose entstehen neue zeitliche Verläufe der Winkel, die zu einem definierten Zeitpunkt mit der Zwischenpose übereinstimmen und später wieder in die ursprüngliche Bewegung übergehen. Hierbei lassen sich die Zwischenposen mit dem *Human Input Device* generieren oder über ein auf der Maus-basierten Graphical User Interface.

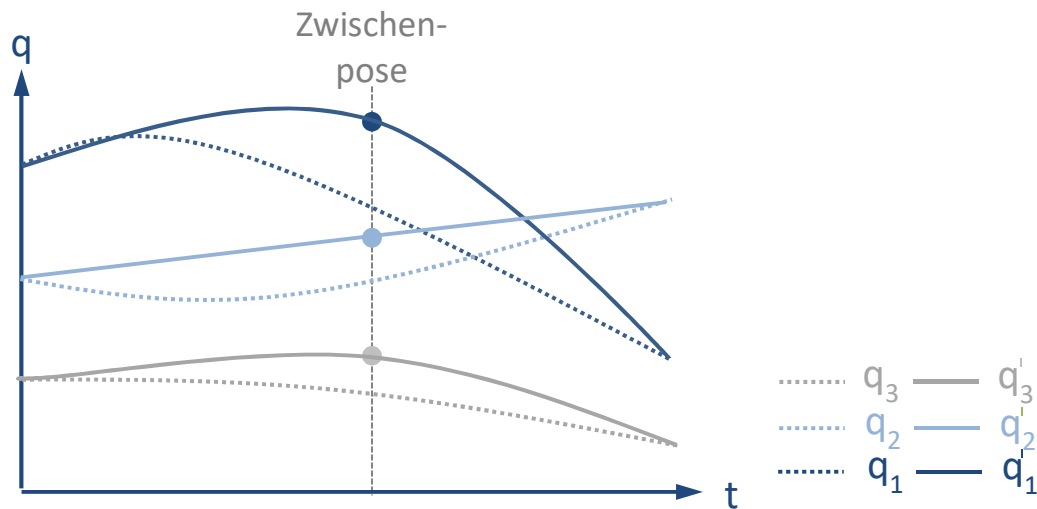


Abbildung 5.4: Änderung einer parametrisch generierten Bewegung über eine Zwischenpose

Komplexe Bewegungen, wie sie beispielsweise bei Montagevorgängen im Fahrzeuginnenraum durchgeführt werden oder etwa die Handhabung von speziell entwickelten Betriebsmitteln, lassen sich bisher nicht parametrisch beschreiben (siehe 2.2.4). Diese Vorgänge können über die Keyframing-Methode beschrieben werden. Grundsätzlich können die einzelnen Posen dabei über die direkte Manipulation des Menschmodells mithilfe von Vorwärts- oder inverser Kinematik erzeugt werden. Anstelle eines auf der mausbasierten Graphical User Interface kann diese wiederum mit dem *Human Input Device* durchgeführt werden. Weiterhin lassen sich Posen parametrisch erzeugen. Hier werden z.B. der Typ der Verrichtung, wie etwa ein Hinlangen, vorgegeben, dazu wird das Zielobjekt, zu dem hingelangt werden soll, festgelegt. Letztlich wird aus der Gesamtheit der Eingaben eine Zielpose erzeugt, die als Keyframe in die Bewegung einfließt. Etwaige Zwischenposen werden nicht erzeugt und müssen über die direkte Manipulation des Menschmodells durchgeführt werden. Des Weiteren lassen sich noch Posen über Haltungsbibliotheken (siehe 2.2.3) erzeugen. Diese sind allerdings nicht parametrisch beschrieben. Dass sich eine Pose aus der Haltungsbibliothek für die individuellen, unterschiedlichen Randbedingungen bei komplexen Bewegungen eignet, stellt allerdings eine Ausnahme dar.

5.2 Einsatzszenarien

Im vorangegangenen Abschnitt wurden die Anwendungen des *Human Input Device* zur Planung- und Gestaltung manueller Arbeitsprozesse abstrakt eingegliedert. An dieser Stelle soll nun anhand von konkreten und kurzen Beispielen dessen Anwendung verdeutlicht werden. Die Beispiele sind verhältnismäßig einfach und allgemein gehalten, um dessen Übertragbarkeit auf eine möglichst große Anzahl an Anwendungsfällen zu verdeutlichen.

5.2.1 Keyframing

Zunächst soll an einem Beispiel die Nutzung des *Human Input Device* beim Keyframing dargestellt werden. Die Ausgangssituation wird in der Abbildung 5.5 dargestellt. In dieser befindet sich das Menschmodell, stehend vor einem Regal, mit mehreren Kleinladungsträgern. Es soll nun eine Bewegung generiert werden, in der das Menschmodell in den Kleinladungsträger hineinlangt, der sich direkt vor ihm in der obersten Ebene des Regals liegt und in dem sich eine Schraube befindet.

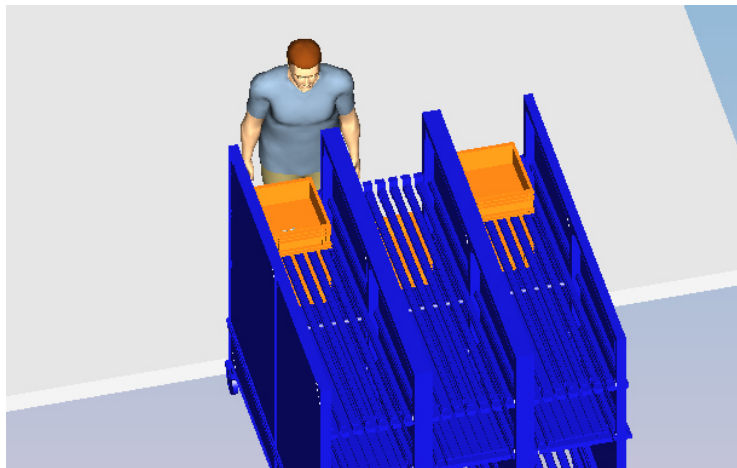


Abbildung 5.5: Ausgangsdarstellung des Keyframing-Beispiels

Dass es an dieser Stelle ungünstig ist, die Zielpose über die Funktion der parametrischen Generierung der Körperhaltung von *Process Simulate* zu erzeugen, zeigt die Abbildung 5.6. Es ist ersichtlich, dass selbst wenn man vereinfachend Kollisionen zwischen dem Menschmodell und dem Regal bzw. Kleinladungsträger zulässt, die Haltung des Menschmodells unrealistisch und nicht zielführend ist. Es besteht demnach die Notwendigkeit, die Zielpose und Zwischenposen (für Kollisionsvermeidung) zu definieren. Dies soll mit dem *Human Input Device* durchgeführt werden.

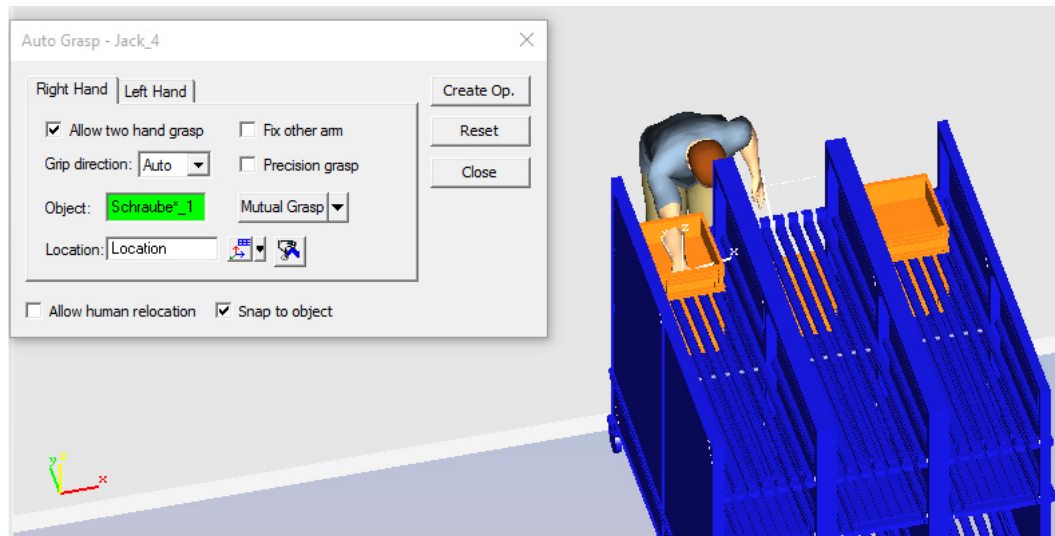


Abbildung 5.6: Parametrisch erzeugte Zielpose.

Für die Bewegungsgenerierung mit dem *Human Input Device* wurden insgesamt drei Keyframes bzw. Körperhaltungen hierzu erzeugt. Die erste Körperhaltung des Menschmodells und des *Human Input Device* zeigt Abbildung 5.7. Der Kopf ist ein wenig zum Kleinladungsträger gedreht bzw. geneigt, der rechte Arm angehoben und angewinkelt und der Rumpf leicht nach vorne geneigt.

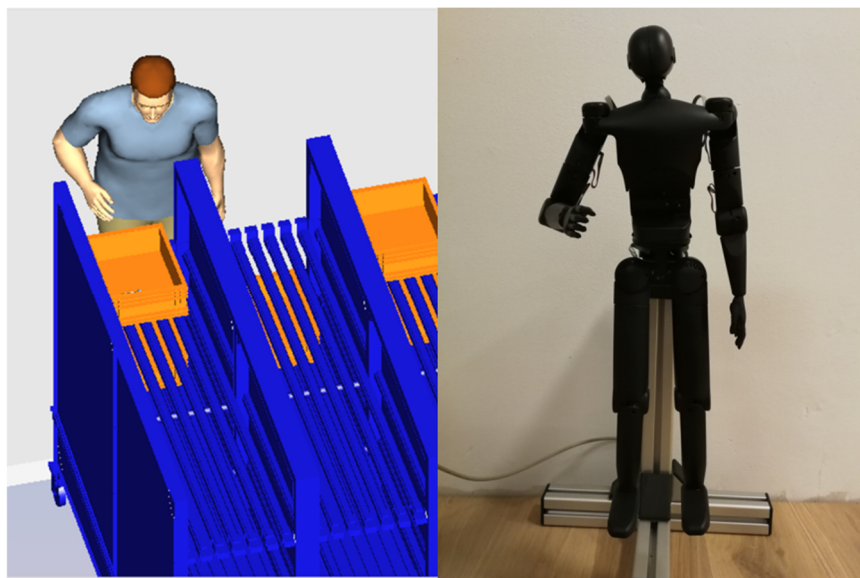


Abbildung 5.7: Erste Zwischenpose

In der nächsten Zwischenpose (Abbildung 5.8) ist der Kopf weiter zum Kleinladungsträger bzw. zur darin liegenden Schraube gerichtet, der rechte Arm wird weiter angehoben, sodass der Ellenbogen auf Schulterhöhe liegt. Weiterhin ist der Rumpf weiter nach vorne gebeugt und der linke Arm wird ein wenig seitlich angehoben, während der Ellenbogen leicht angewinkelt ist.

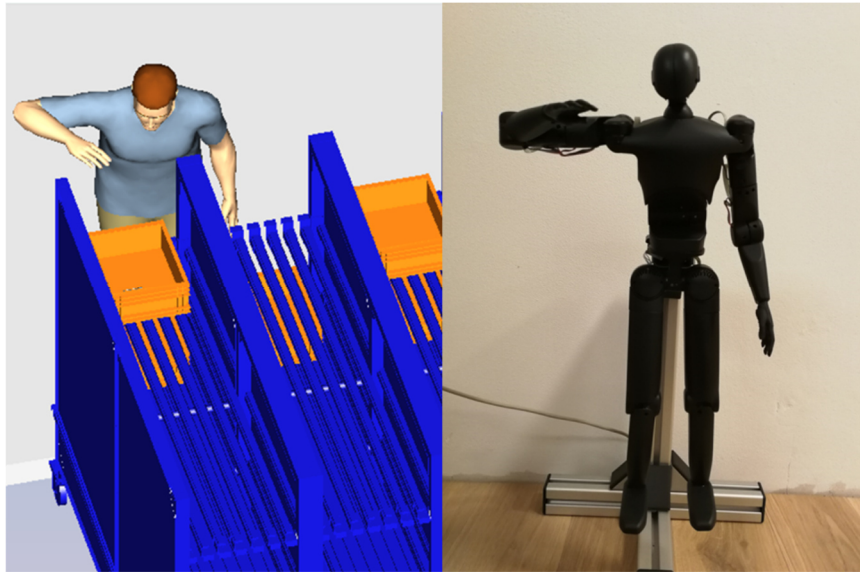


Abbildung 5.8: Zweite Zwischenpose

In der Zielpose, die in Abbildung 5.9 dargestellt ist, befindet sich die linke Hand dann an der Schraube. Dabei ist der Rumpf noch weiter nach vorne geneigt und der Blick zur Schraube gerichtet. Der linke Arm ist zudem noch ein wenig weiter angehoben.

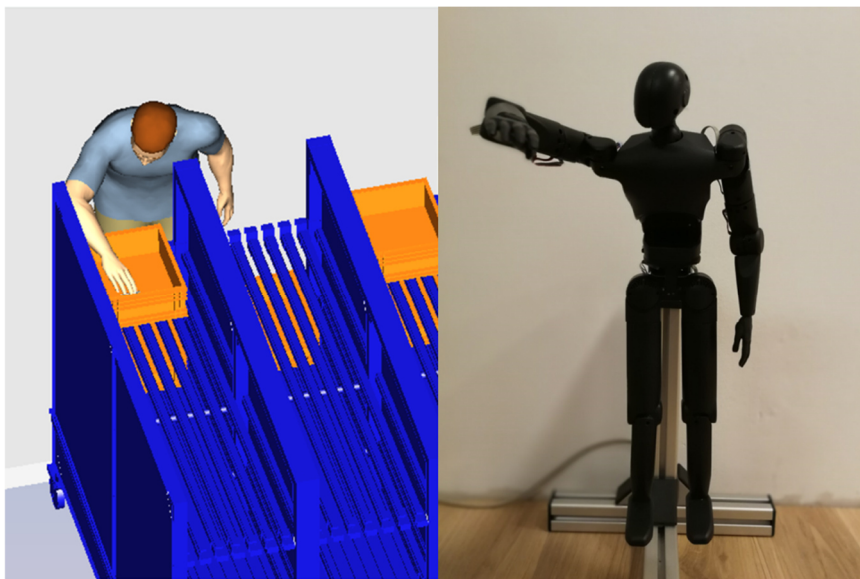


Abbildung 5.9: Zielpose

Aus der Ausgangs- und den drei definierten Körperhaltungen entsteht abschließend in der kinematischen Simulation eine diskretisierte Bewegung, indem zwischen den Keyframes zusätzliche Frames interpoliert werden. Aus Gründen der Übersicht kann an dieser Stelle nur eine Bewegung mit sehr grober Auflösung (zehn Frames) gezeigt werden.

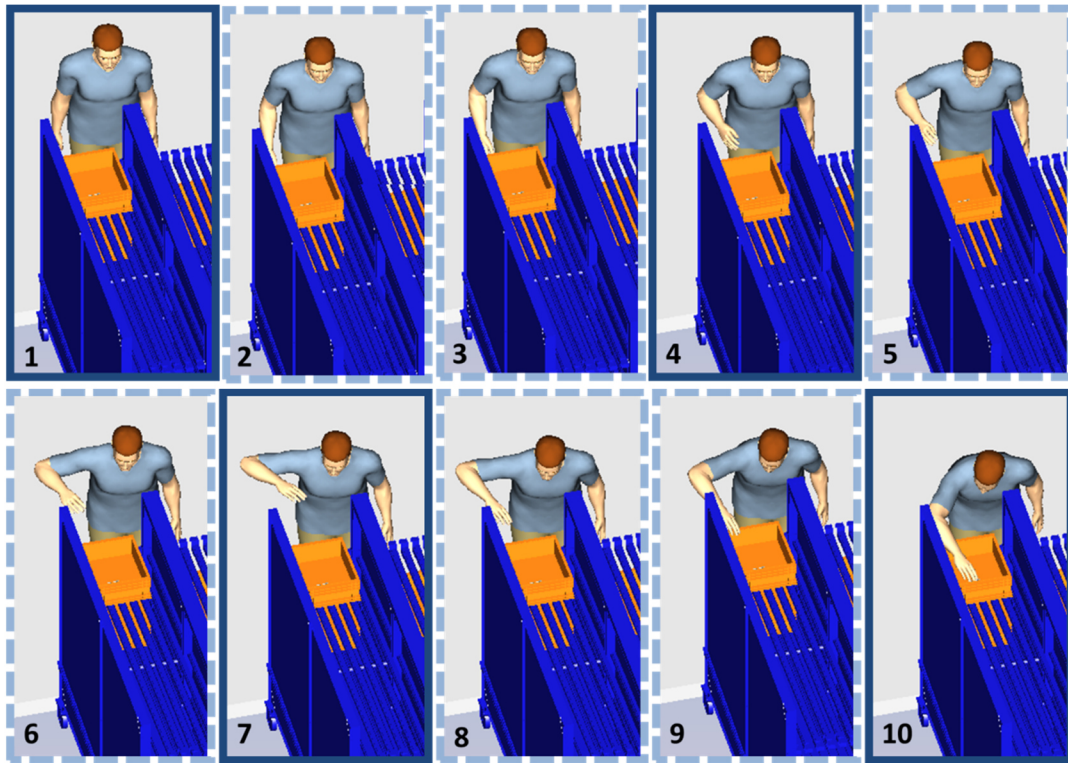


Abbildung 5.10: Diskretisierte Bewegung (Keyframes: durchgezogener Rahmen, interpolierte Frames: gestrichelter Rahmen)

5.2.2 Modifikation aufgabenbasiert definierter Bewegungen

Im Folgenden wird anhand eines Beispiels der Einsatz des *Human Input Device* zur Modifikation von Bewegungen gezeigt, die aufgabenbasiert definiert worden sind. In der Ausgangsbetrachtung steht dabei ein Menschmodell ca. 2 m von einem Tisch entfernt. Auf diesem befindet sich ein Kleinladungsträger, in dem eine Schraube liegt. Es soll nun ein Prozess modelliert werden, bei dem das Menschmodell vor den Tisch geht und dann mit der rechten Hand zur Schraube hinlangt. Es handelt sich demnach um eine relativ einfache Abfolge von Bewegungen, bei der die geometrischen Einflussfaktoren von Werkstück und Betriebsmittel auf die Bewegungen gering sind. Um den Vorgang zu realisieren, wird über den Befehl *Task Simulation Builder* ein *Get Task* angelegt (siehe Abbildung 5.11, links). Als Objekt, zu dem hingelangt werden soll, wird die Schraube festgelegt, die sich im Kleinladungsträger befindet. Automatisch wird dann zunächst auf Basis der Eingabe eine Gehbewegung zum Tisch erzeugt, damit das Menschmodell beim Hingelangen die Schraube erreichen kann (Abbildung 5.11, rechts). Die Zielposition der Gehbewegung kann daraufhin noch manuell verändert werden, was in diesem Fall allerdings nicht notwendig ist.

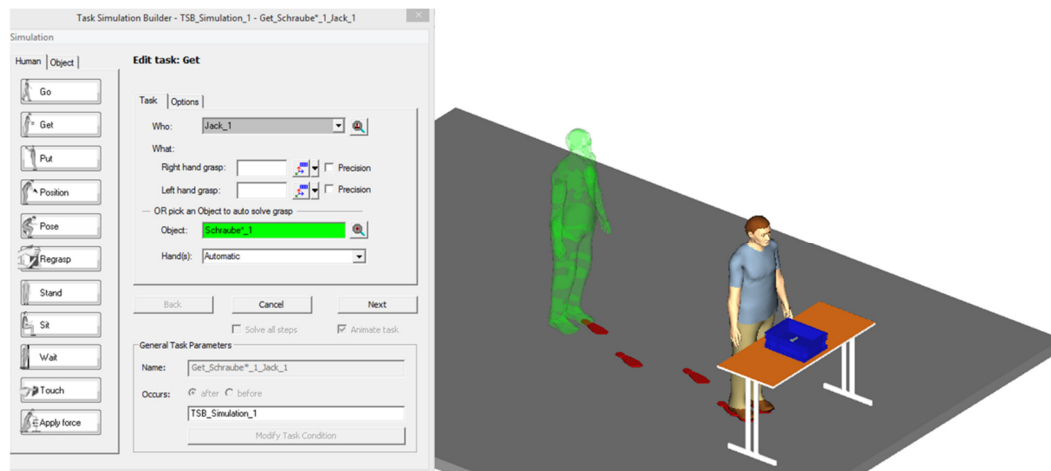


Abbildung 5.11: Anlegen eines *Get Task* (links) und Generierung einer Gehbewegung (rechts)

Anschließend erfolgt automatisch die Generierung der Bewegung für das Hinlangen zur Schraube. Bei dieser Bewegung, die Abbildung 5.12 darstellt, wird der Kleinladungsträger als Barriere ignoriert und das Menschmodell durchdringt dabei diesen.

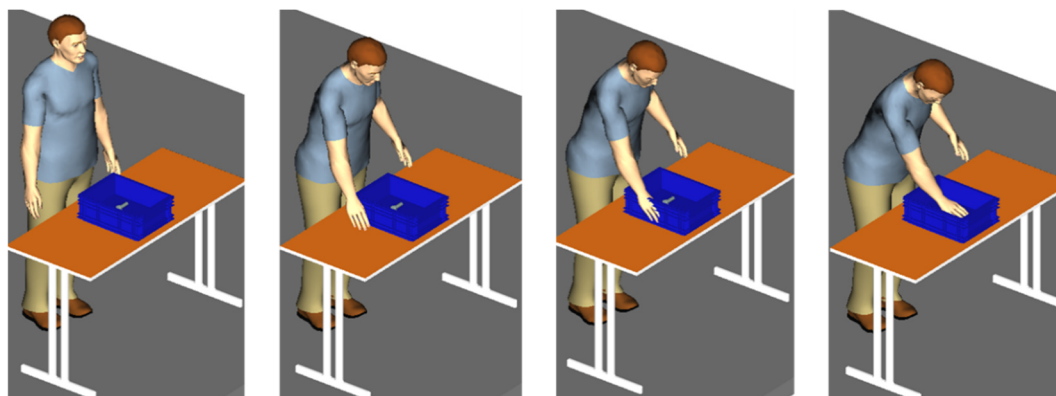


Abbildung 5.12: Automatisch erzeugte Hinlangbewegung zur Schraube

Um dies zu verhindern, ist es möglich, über den Dialog die Bewegung durch die Definition einer Zwischenpose zu modifizieren. Hierfür wurde das *Human Input Device* verwendet. Abbildung 5.13 zeigt links die Ausgangspose der Hinlangbewegung, in orange die definierte Zwischenpose und in grün die Zielpose der Hinlangbewegung. Auf der rechten Seite ist die Konfiguration des *Human Input Device* dargestellt, mit der die Körperhaltung der Zwischenpose generiert wurde. Die Konfiguration des rechten Handgelenks wurde über die Maus-basierte Schnittstelle durch Vorwärtskinematik definiert. Bei der nun resultierenden Hinlangbewegung wird eine Durchdringung von Menschmodell und Kleinladungsträger verhindert.

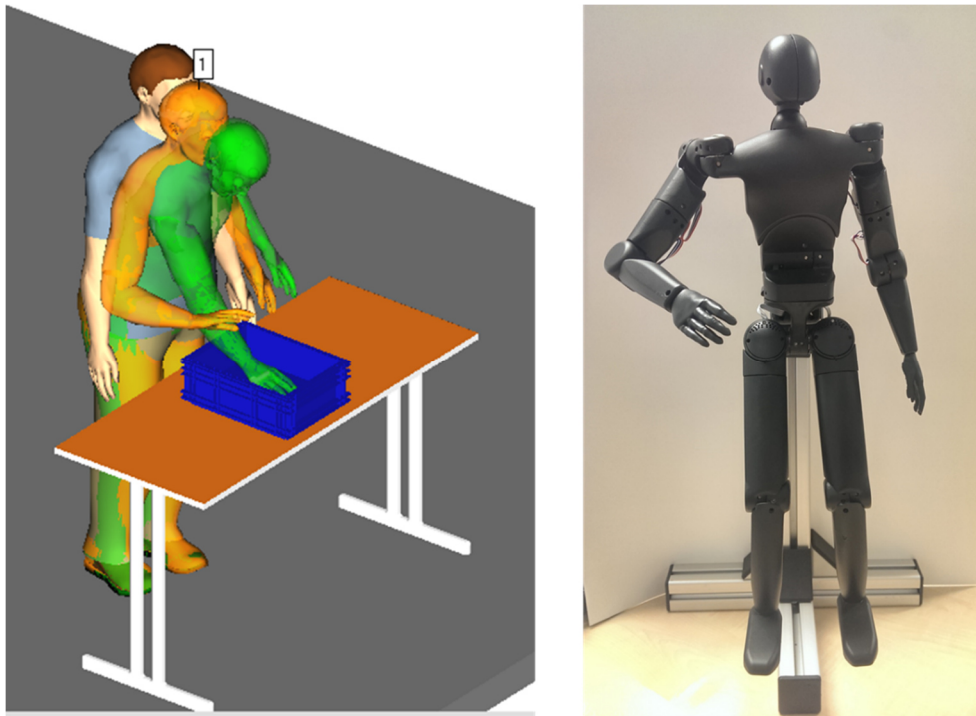


Abbildung 5.13: Verwendung des Human Input Device zur Definition einer Zwischenpose

5.2.3 Änderung von auf Basis von Motion Capturing erstellter Bewegungen

Prinzipiell ist es möglich, Bewegungen, die über Motion Capturing erstellt worden sind, im Nachhinein über die Keyframing-Methode, also ohne den erneuten Einsatz von Motion-Capturing-Equipment, zu ändern. Denkbar wäre dies zum Beispiel, wenn ein manueller Vorgang, der zunächst mit Motion Capturing aufgenommen wurde, sich im späteren Planungsverlauf produkt- oder prozessbedingt ändert. Die Änderung ist dabei aber nur vom geringen Ausmaß, sodass der Aufwand im Verhältnis zum Nutzen für eine erneute Motion-Capturing-Aufnahme inkl. vorbereitender Tätigkeiten zu hoch wäre. Bei der Definition der charakteristischen Posen für das Keyframing könnte hierbei das *Human Input Device* eingesetzt werden, was im Folgenden anhand eines Beispiels beschrieben wird.

Abbildung 5.14 zeigt eine Bewegungsfolge, in der das Menschmodell *Jack*, das in der rechten Hand eine Schraube hält, zu einem Tisch geht. Anschließend erfolgt eine Bringbewegung mit der rechten Hand zum Tisch, um diese dort abzulegen. Die Bewegungsfolge wurde in *Process Simulate* über Motion Capturing unter Verwendung der *Kinect* von *Microsoft* erstellt.

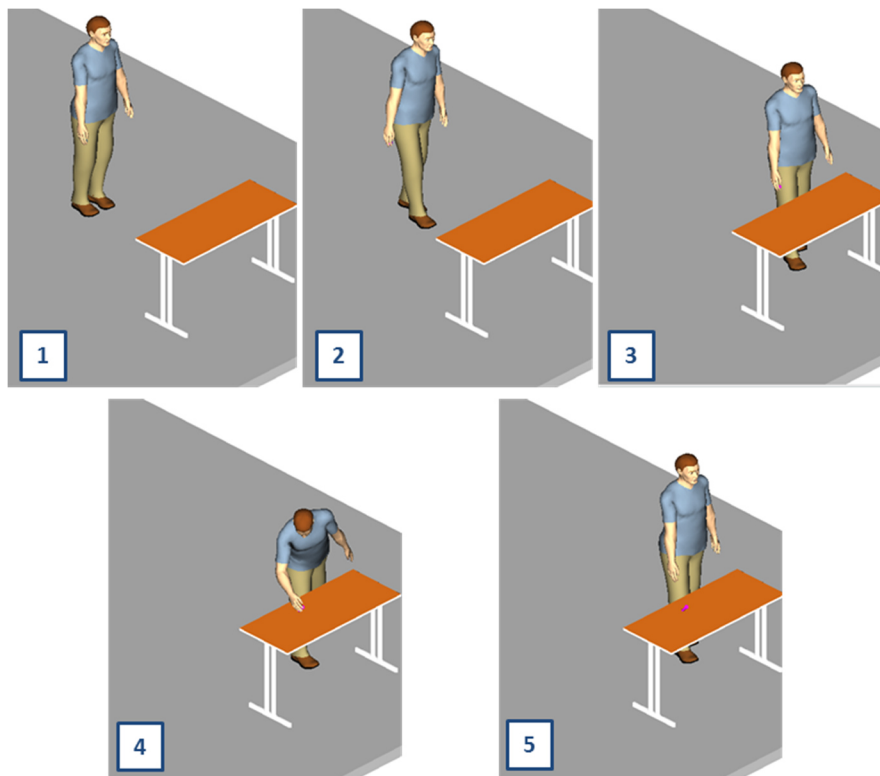


Abbildung 5.14: Mit Motion Capturing erstellte Geh- und anschließender Hinlangsbewegung.

Der Prozess soll nun dahingehend verändert werden, dass das Menschmodell, bevor es zur Schraube ablegt, zunächst ein Bauteil aus einem Kleinladungsträger aufnimmt. Hierzu werden mit dem *Human Input Device* zwei Keyframes erzeugt bzw. Körperhaltungen definiert, was Abbildung 5.15 aufzeigt. Zum einen ist dies die Zielpose (rechts), also das Ende der Bewegung nach dem Hinlangen zum Bauteil, und zum anderen eine Pose unmittelbar davor bzw. danach (links), um Kollisionen bzw. Durchdringungen von Menschmodell und Kleinladungsträger zu vermeiden.

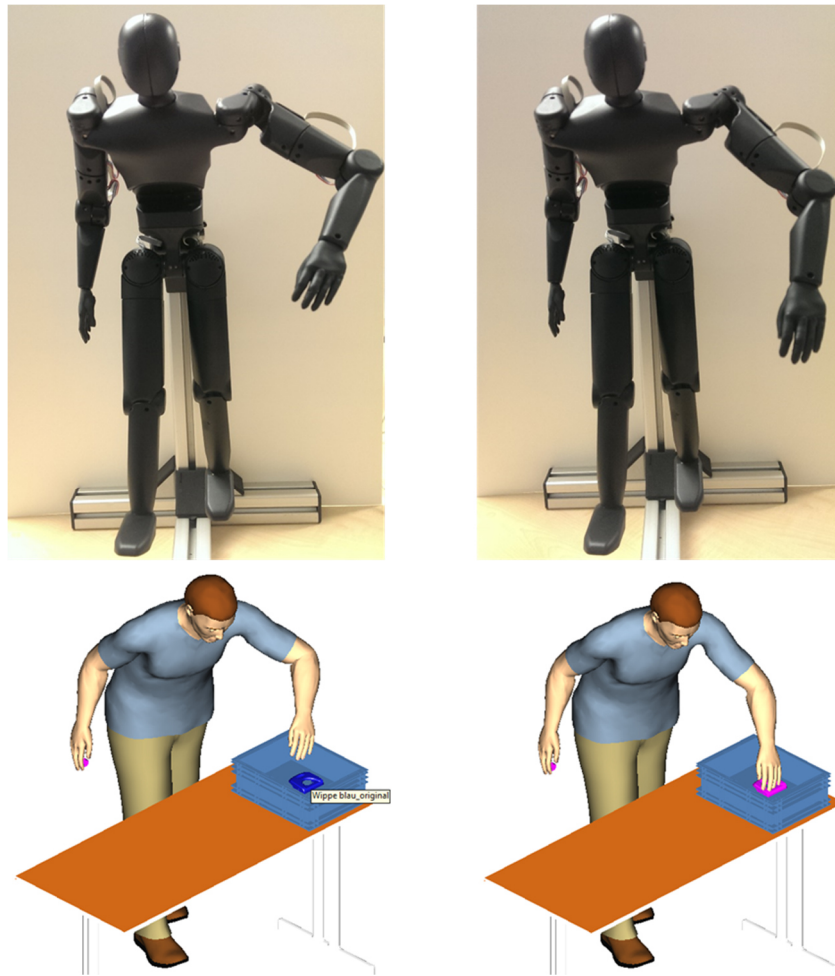


Abbildung 5.15: Definition der Keyframes für das Hinlangen zum Bauteil mit dem *Human Input Device*

Den auf Basis dieser beiden Posen geänderten Ablauf zeigt Abbildung 5.16. Die Gehbewegung (Bild-Nr. 1-3) bleibt dabei unverändert. Das Ende der Gehbewegung (Bild-Nr.3) dient dann als Ausgangpose für die eingefügte Keyframing-Sequenz (Bild-Nr. 3.1-3.3). Dabei langt das Menschmodell über die definierte Zwischenpose (Bild. 3.1) zum Locher hin (Bild 3.2) und führt eine Entnahme-Bewegung über dieselbe Zwischenpose (Bild 3.3) durch. Ausgehend davon erfolgt eine Anschlussbewegung an die Motion-Capturing-Sequenz zur Ablagepose der Schraube. Das Loslassen und Aufrichten (Bild-Nr. 4-5) erfolgt dann wieder über die ursprüngliche Motion-Capturing-Aufnahme.

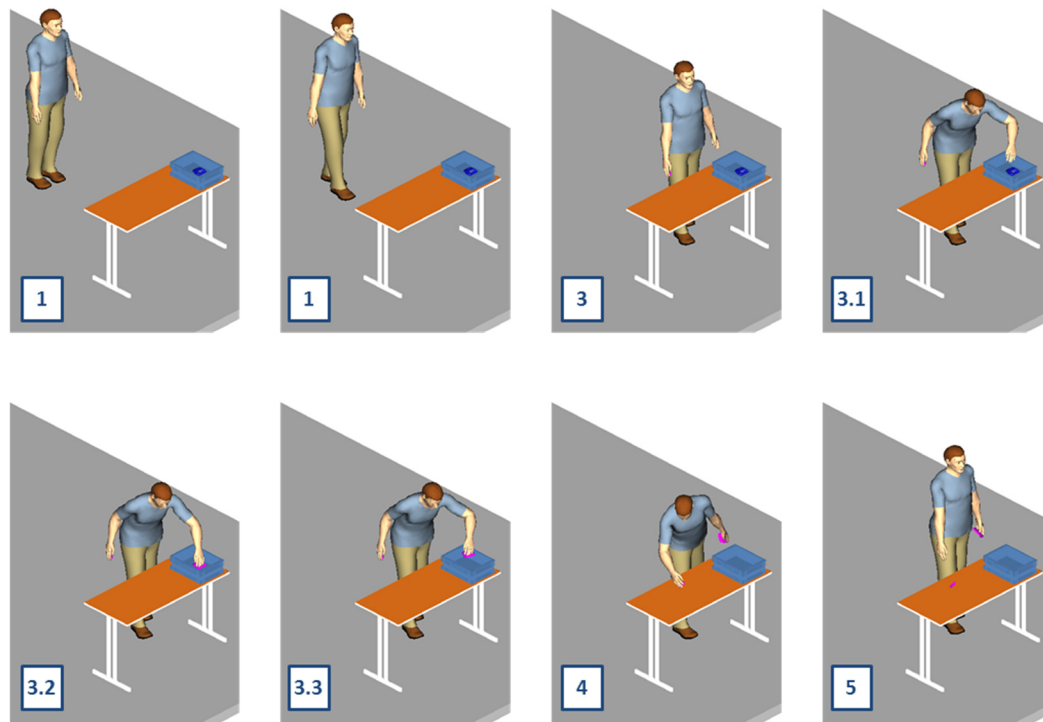


Abbildung 5.16: Ablauf nach Änderung.

5.2.4 Einsatz in Workshops und Besprechungen

Dadurch, dass Laien, die nicht mit der Bedienung von Softwaretools zur Ergonomiesimulation vertraut sind, das *Human Input Device* verhältnismäßig einfach bedienen können, eignet es sich ebenfalls für den Einsatz in Workshops und Besprechungen.

Dies könnten beispielsweise Workshops zur Gestaltung zukünftiger Produktionsprozesse mit manuellen Tätigkeiten sein, bei denen der virtuelle Produktionsprozess mit den beteiligten planenden und operativen Gewerken gestaltet und optimiert wird. Zentrales Element stellt hierbei die Ergonomiesimulation dar. Das *Human Input Device* könnte dabei hilfreich sein, Beteiligten, die ein hohes Prozess-Know-How besitzen, wie etwa Meister oder Werker, aber nicht mit dem Umgang der Ergonomiesimulation vertraut sind, besser in den Gestaltungsprozess mit einzubinden. Diese könnten über das *Human Input Device* in Anwesenheit von Ergonomiesimulationsexperten direkt Vorschläge zur Gestaltung generieren. Ebenfalls denkbar wäre die Anwendung in sogenannten 3P-Workshops (Production Preparation Process), die beispielsweise in der Automobilindustrie durchgeführt werden (Volkswagen, 2007). Hier werden zukünftige Produktionsprozesse ebenfalls mit allen beteiligten planenden und operativen Gewerken gestaltet und optimiert. Basis stellt hierbei allerdings ein physikalisches Modell des Layouts dar. In Abbildung 5.17 ist eine Szene eines 3P-Workshops bei Volkswagen dargestellt, in der eine zukünftige Lenkungsfertigung größtenteils auf Basis eines Pappkarton-Layouts aufgebaut ist. Überall dort wo diese

Methode an Grenzen stößt, weil evtl. während des Workshops kurzfristig ein Teil des Layouts nicht mit physikalischen Models aufgebaut werden kann, könnte dort unterstützend die Ergonomiesimulation mit dem *Human Input Device* zum Einsatz kommen.



Abbildung 5.17: 3P-Workshop in der Lenkungsfertigung bei Volkswagen (Volkswagen, 2007)

Analoges gilt für den Einsatz in Besprechungen. Hier wäre ein Beispiel etwa eine Kundenpräsentation von Ingenieurdienstleistern, bei denen die Ergebnisse von Ergonomiesimulationen vorgestellt werden. Dem Kunden, der oftmals nicht unmittelbar mit der Bedienung der Softwaretools vertraut ist, kann das *Human Input Device* zur Verfügung gestellt werden. Er kann so direkt in der Simulationsumgebung interagieren und kann dadurch weitere, etwaige Lösungen zur Optimierung beitragen.

5.3 Weiterentwicklungspotentiale

Ausblickend auf eventuelle Weiterentwicklungen des *Human Input Device*, werden in diesem Abschnitt Verbesserungspotentiale aufgezeigt, die unter Umständen die Gebrauchstauglichkeit des Eingabegeräts erhöhen.

5.3.1 Verwendung von Kugelgelenken

Eine Möglichkeit das Eingabegerät weiterzuentwickeln, wäre bei mehrdimensionalen Gelenken Kugelgelenke anstelle von mechanisch seriell verketteten, eindimensionalen Gelenken zu verwenden. Wie bereits in 3.2.3 erläutert, lassen sich durch diese zwar statisch jede Gelenkstellung einstellen, allerdings müssen dabei unter Umständen die einzelnen Freiheitsgrade derart eingestellt werden, dass es nicht immer für den Bediener optimal

intuitiv ist. Dies ist insbesondere beim Schultergelenk der Fall. Ein konkretes Beispiel hierzu wurde ebenfalls bereits in Abbildung 4.9 aufgezeigt. Die Herausforderung bei einer solchen Lösung besteht in der robusten Erfassung der Gelenkstellungen in zwei Richtungen gleichzeitig. Aufgrund des speziellen Anwendungszwecks existieren hierzu bisher wenige Sensoren auf dem Markt, die ähnliche Eigenschaften wie die bisher verwendeten, optischen Drehgeber aufweisen. Andere Lösungen wären der Einsatz von optischen, magnetischen oder inertial-sensorbasierten Motion-Capture-Systemen mit den unter 2.2.4 genannten Nachteilen. Eine weitere mögliche Lösung wie nicht nur die mechanische Umsetzung des Kugelgelenks umgesetzt werden kann, sondern auch wie die Winkelstellung sensorisch erfasst werden kann, ist in der folgenden Abbildung skizziert. Hierbei werden relative Bewegungen zwischen der Kugel und Gelenkpfanne optisch erfasst, nach dem Prinzip der optischen Computermaus, die auf der Tischoberfläche in zwei Richtungen verschoben wird.

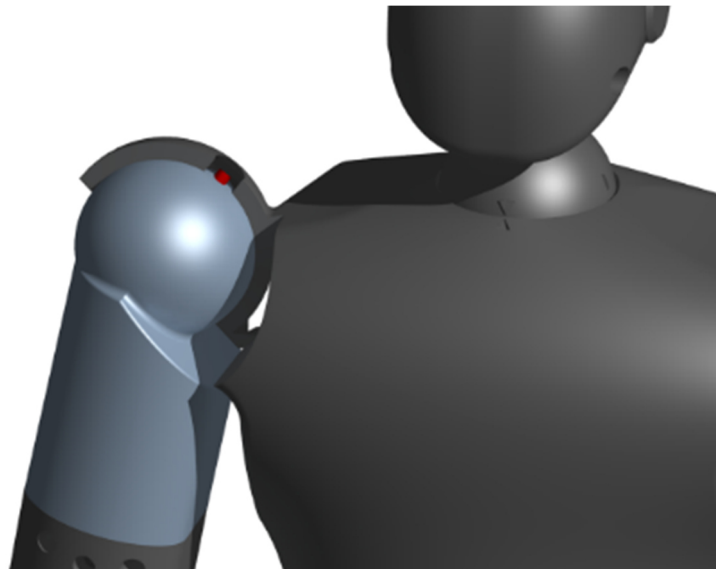


Abbildung 5.18: Kugelgelenk mit Erfassung nach dem Prinzip einer optischen Computermaus

5.3.2 Ausstattung des Human Input Device Antrieben an den Gelenken

Eine weitere Möglichkeit das *Human Input Device* weiterzuentwickeln wäre, dessen Gelenke, die z.Z. nur den Drehwinkel erfassen, über Motoren anzutreiben. So würde ein Eingabegerät entstehen, ähnlich dem von Yoshikazi et al. (Yoshikazi et al., 2011), das in 2.3.4 beschrieben wurde. Eine Voraussetzung wäre aber, dass der Bauraum der Antriebe bzw. die darauf aufbauenden Gelenkeinheiten entsprechend klein ist, sodass das Skelett und die Form des Eingabegeräts weitgehend erhalten bleiben können.

Ein Vorteil dieser Erweiterung liegt in der Vereinfachung des Änderungsprozesses von bereits definierten Körperhaltungen und den daraus resultierenden Bewegungen. Dies wird anhand des Beispielszenarios aus der Nutzerstudie aus Abschnitt 4.3 erläutert. Angenommen die

Höhe des Förderers, auf dem die Lenkgetriebe abgelegt werden, verringert sich und die bereits definierte Zielpose, in der das Menschmodell das Lenkgetriebe abgelegt hat, soll deshalb geändert werden. Abbildung 5.19 zeigt hierzu die ursprünglich definierte Pose des Menschmodells. Die alte Höhe des Förderers, des Lenkgetriebes und des Werkstückträgers sind dabei transparent dargestellt. Die Objekte in der neuen Höhe sind deckend dargestellt.

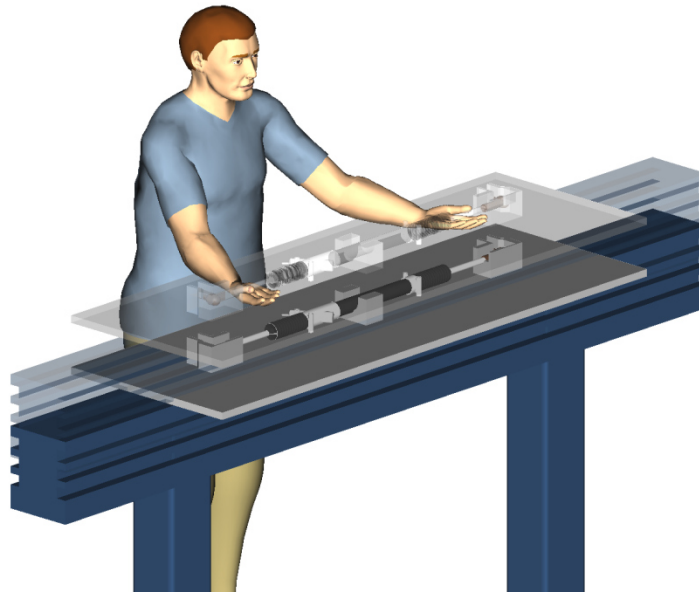


Abbildung 5.19: Änderung der Förderhöhe des Lenkgetriebes

Um die Zielpose auf die geänderten Umstände hin anzupassen, müsste diese nun, gegenüber der ursprünglichen Pose, dahingehend geändert werden, dass die Flexion des Torsos ein wenig erhöht wird. Es muss demnach nur der Freiheitsgrad einer Gelenkgruppe etwas angepasst werden (Abbildung 5.20).

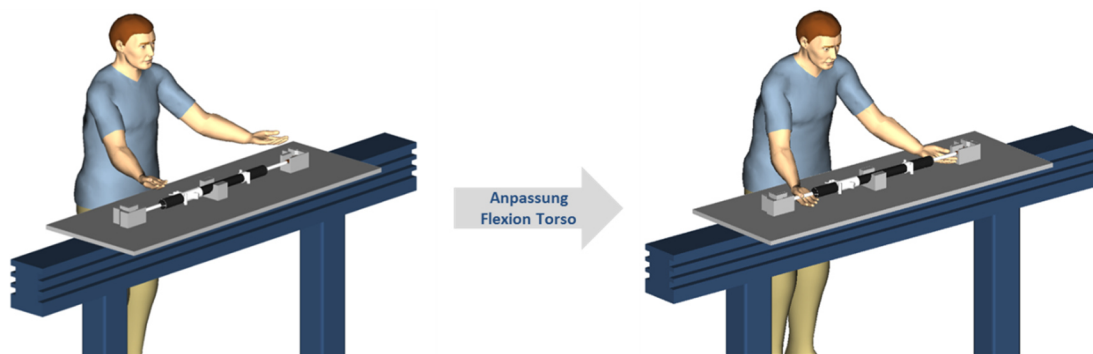


Abbildung 5.20: Anpassung der Zielpose durch Änderung der Ausgangspose

Würde die Anpassung der Zielpose an die neue Förderhöhe mit dem *Human Input Device* vorgenommen werden, so würde dies nach Abbildung 5.21 ablaufen. Zu Beginn würde sich die Eingabepuppe in einer zufälligen Ausgangspose befinden. Zum Beispiel könnte dies, wie in Abbildung 5.21 dargestellt, eine neutrale, aufrechtstehende Haltung sein. Das Menschmodell

würde dann eine, der Eingabepuppe entsprechende, Körperhaltung einnehmen. Im nächsten Schritt würde diese Pose dann zur Zielpose hin geändert werden. Hierzu müsste dann der Torso in einem und die beiden Schultern in jeweils drei Freiheitsgraden angepasst werden.

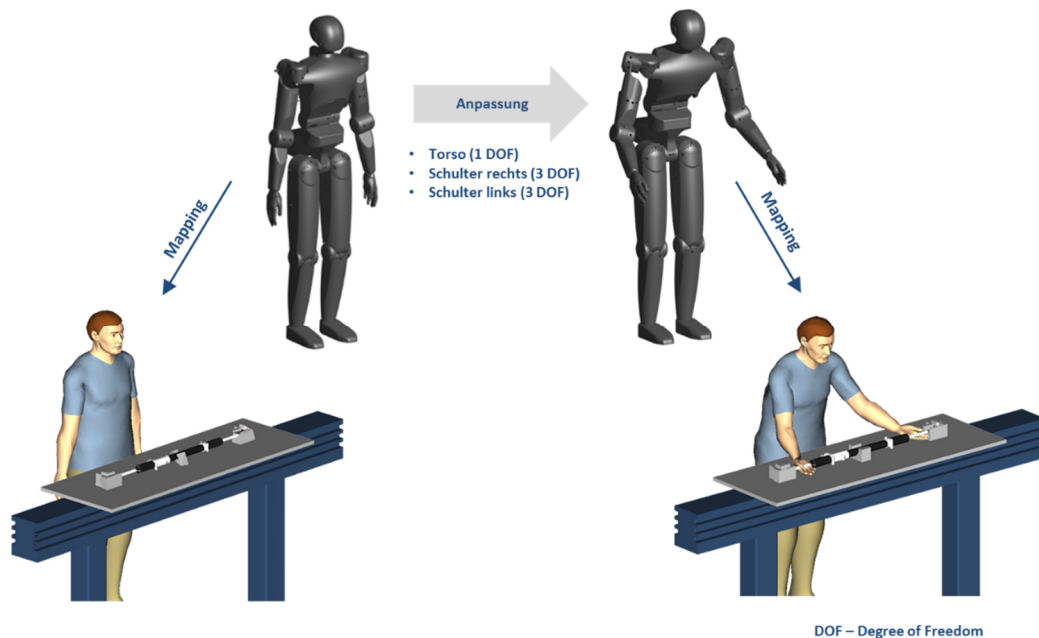


Abbildung 5.21: Anpassung einer Zielpose mit der Eingabepuppe

Die Anpassung der Körperhaltung an die neue Förderhöhe mit dem (passiven) *Human Input Device* stellt einen höheren Aufwand gegenüber der Änderung von alter zu neuer Zielpose dar, die lediglich der Anpassung eines Freiheitsgrades bedarf. Eine um angetriebene Gelenke erweiterte Eingabepuppe könnte diesen Aufwand verringern. Das Anpassen von Körperhaltungen mit einer solchen Erweiterung zeigt Abbildung 5.22. Zunächst wird über die Antriebe die Körperhaltung der ursprünglichen Zielpose auf die Eingabepuppe gemappt. Dann wird die Körperhaltung der Eingabepuppe in Richtung Zielpose geändert. Hierbei muss dann im aufgezeigten Beispiel nur die Flexion des Torsos, also nur ein Freiheitsgrad, angepasst werden. Diese Körperhaltung wird dann auf das digitale Menschmodell übertragen.

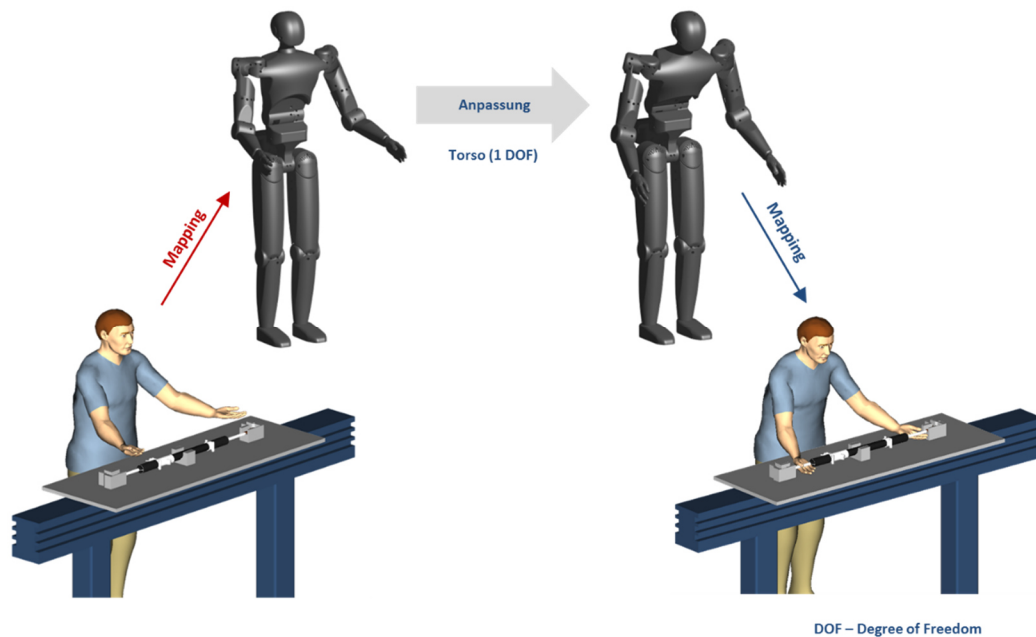


Abbildung 5.22: Anpassung einer Zielpose mit einer angetriebenen Eingabepuppe

Neben der einfacheren Änderung bereits definierter Körperhaltungen könnten angetriebene Gelenke über *Force Feedback* den Anwender bei der ergonomischen Gestaltung manueller Arbeitsprozesse zusätzlich unterstützen. Beim Bedienen der Eingabepuppe könnte sich gezielt der Widerstand einzelner Gelenke variabel vergrößern, je unergonomischer die aktuelle Körperhaltung des Menschmodells wäre. Unter der Annahme, dass Bewegungsabläufe, die auf möglichst ergonomischen Einzelposen aufgebaut sind, auch insgesamt häufig ergonomisch vorteilhaft bewertet werden, könnte diese Erweiterung unterstützend bei der Auslegung der Arbeitsprozesse helfen. Die ergonomische Bewertung und die daraus resultierenden Widerstände der Gelenke gegen Verdrehung sollten dabei auf etablierten Bewertungsmethoden basieren. Eine Methode könnte unter anderem dabei die Bewertung nach dem *Ovako Working posture Analysis System (OWAS)* darstellen, das auch neben weiteren Methoden in *Process Simulate* integriert ist.

Dabei wird die Körperhaltung durch einen vierstelligen Kode repräsentiert. Die erste Ziffer drückt dabei die Haltung des Rückens, die zweite Ziffer die der Arme, die dritte Ziffer die der Beine und die vierte Ziffer das Gewicht aus. Aus der Kombination werden die Codes in Aktionskategorien klassifiziert. Diese reicht von „1“ („keine Änderung nötig“) bis „4“ („sofortige Maßnahmen zur Abhilfe“). (Gudehus, 2009).

Wie ein *Force Feedback* in Verbindung mit der Bewertung nach *OWAS*, unter Verwendung einer angetriebenen Eingabepuppe, umgesetzt werden könnte, ist in Abbildung 5.23 aufgezeigt. Im Diagramm ist das Betätigungsmoment für die Beugung (Flexion) des Torsos qualitativ über dessen Drehwinkel aufgetragen. Unter dem Diagramm sind an drei

unterschiedlichen Stellen des Drehwinkels die dazugehörigen Körperhaltungen des Menschmodells dargestellt. Die Veränderung der Beugung wird, ausgehend aus einer sitzenden Haltung, mit dem OWAS-Kode „1111“ vorgenommen. Also einer geraden Körperhaltung (erste Ziffer), mit beiden Armen unterhalb der Schulterhöhe (zweite Ziffer), sitzend (dritte Ziffer) und weniger als 10 kg Last. Um nun die Eingabepuppe zu beugen, ist ein bestimmtes, konstantes Drehmoment notwendig, bis die Haltung des Rückens nach OWAS von einer geraden in die gebeugte Haltung übergeht. Dies drückt sich dadurch aus, dass die erste Ziffer des Codes mit „2“ bewertet wird. Die Kombination des Gesamtkodes wird dann der Aktionskategorie „2“ zugeordnet („Maßnahmen zur Abhilfe in naher Zukunft“). In *Process Simulate* wird dann der Torso gelb eingefärbt. Eine angetriebene Eingabepuppe könnte dem Nutzer hier ein Feedback geben, indem das notwendige Moment zur weiteren Beugung sprunghaft ansteigt, also ein spürbarer Widerstand überwunden werden müsste. Neben der zusätzlichen Informationsrückmeldung könnte dies den Nutzer zusätzlich sensibilisieren, sodass er ggf. alternative Gestaltungsmöglichkeiten prüft. Analog dazu könnten die Betätigungsmomente bei einer Klassifizierung in höhere Aktionskategorien erfolgen.

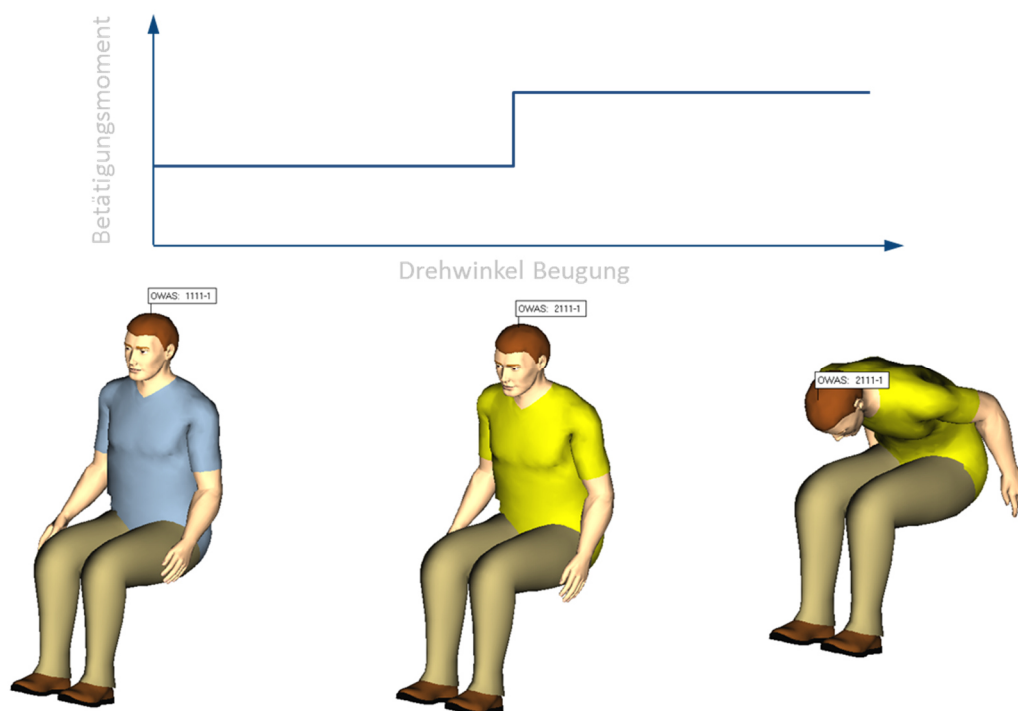


Abbildung 5.23: Force Feedback über die Eingabepuppe und der Bewertung nach der *OWAS-Methode*

5.3.3 Erweiterung des Human Input Device zu einem Tangible User Interface

In Unterabschnitt 3.2.5 wurde der Vorgang des Einstellens einer Zielpose mit dem *Human Input Device* als Regelkreis skizziert (siehe Abbildung 3.24). In diesem stellt der Benutzer eine gewünschte Zielpose an der Eingabepuppe ein. Auf dem Computerbildschirm erfasst er dann die eingestellte Pose. Hierbei wird zum einen die Körperhaltung des Menschmodells an sich, sowie dessen Wechselwirkung mit der Umgebung des virtuellen Arbeitsplatzes berücksichtigt. Ist der Benutzer mit der eingestellten Pose nicht zufrieden, korrigiert er die Körperhaltung mit der Eingabepuppe und kontrolliert das Ergebnis erneut am Computerbildschirm. Dies erfolgt solange, bis er mit der eingestellten Körperhaltung zufrieden ist. Der Benutzer muss dabei immer wieder Abweichungen in der Projektion der digitalen Welt erfassen und anhand der Eingabepuppe in der realen Welt korrigieren. Dies setzt, neben der erforderlichen kognitiven Leistung, ein häufiges Verschieben des Blickes voraus (Abbildung 5.24)

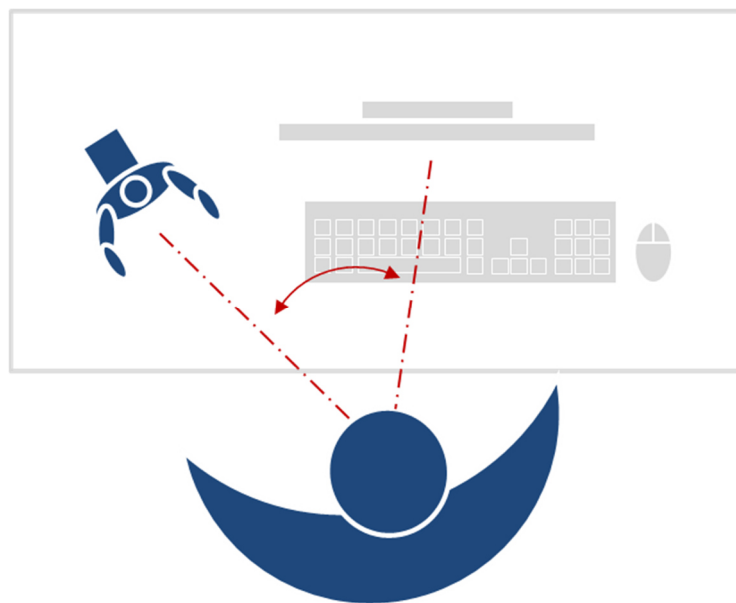


Abbildung 5.24: Blickverschieben zwischen Eingabepuppe und Bildschirm bei der Bedienung

Die Weiterentwicklung der Benutzungsschnittstelle zu einem Tangible User Interface könnte dem Benutzer diesen Prozess erleichtern. In Erweiterung zu einem Graspable User Interface zeichnet diese Benutzungsschnittstelle aus, dass die realen Eingabegeräte mit digitalen Informationen überlagert werden, sodass Eingabe- und Ausgabegeräte verschmelzen (siehe Unterabschnitt 2.3.3). Auf Basis des *Human Input Device* könnte eine Lösung, ähnlich der von Barakonyi & Schmalstieg (Barakonyi & Schmalstieg 2005, 2006), entstehen (siehe Unterabschnitt 2.3.4). In dessen Benutzungsschnittstelle setzen Benutzer ein Head Mounted Display auf. Durch dieses wird eine Gliederpuppe mit einem digitalen Animation-Charakter überlagert, sodass die Körperhaltungen der Puppe und des Charakters annähernd

übereinstimmen (siehe Abbildung 2.41). Die Körperhaltung des digitalen Charakters wurde über inverse Kinematik bestimmt, indem die räumliche Anordnung von Händen, Füßen und Kopf der Puppe getrackt wurden.

Technisch umsetzen ließe sich diese Lösung z.B. mit dem Head Mounted Display *HoloLens* von *Microsoft*. Durch diese kann für den Benutzer die reale Welt mit digitalen Informationen erweitert werden (Augmented Reality). Abbildung 5.25 zeigt die *HoloLens* beim Design von dreidimensionalen Charakteren für die Unterhaltungsindustrie. Dabei wird für den Designer das erstellte Modell auf den Schreibtisch projiziert, sodass es begutachtet werden kann.



Abbildung 5.25: Anwendung der *Microsoft HoloLens* bei der Erstellung eines 3D-Charakters (Tsunoda)

Wie eine solche Benutzungsschnittstelle aus Sicht eines Benutzers aussehen könnte, skizziert Abbildung 5.26. Die Eingabepuppe steht auf dem Schreibtisch und durch das Head Mounted Display wird die Puppe mit dem *Jack-Modell* überlagert. Das *Jack-Modell* ist dabei transparent eingeblendet, damit der Benutzer die Eingabepuppe zur Manipulation noch sehen kann. Im Gegensatz zur der von Barakonyi & Schmalstieg (Barakonyi & Schmalstieg 2005, 2006) hätte diese Lösung den Vorteil, dass die Körperhaltung des *Jack-Modells* über Vorwärtskinematik berechnet wird, wodurch unrealistische Körperhaltungen vermieden werden. Zusätzlich wird die virtuelle Umgebung aus Betriebsmitteln und Produkten ebenfalls mit eingeblendet. Unter Einbeziehung dieser Umgebung würde dem Benutzer nun der Abgleich zwischen Soll- und Ist-Körperhaltung des Menschmodells erleichtert. Über die Augmented Reality wird dem Anwender weiterhin die Beurteilung der Ist-Pose erleichtert. Zum einen ermöglicht das Head Mounted Display eine 3D-Darstellung für den Anwender, wodurch gegenüber der 2D-Projektion eine zusätzliche wahrgenommene Raumdimension zur Verfügung steht. Hierdurch können u. U. Längen und Abstände besser wahrgenommen werden. Darüber hinaus ist es für den Benutzer wesentlich einfacher, durch die natürliche Bewegung seines Kopfes die Ansicht zu verändern. Diese beiden Erleichterungen für den

Anwender würden höchstwahrscheinlich auch den zeitlichen Aufwand beim Einstellen der Körperhaltung nochmals verkürzen.

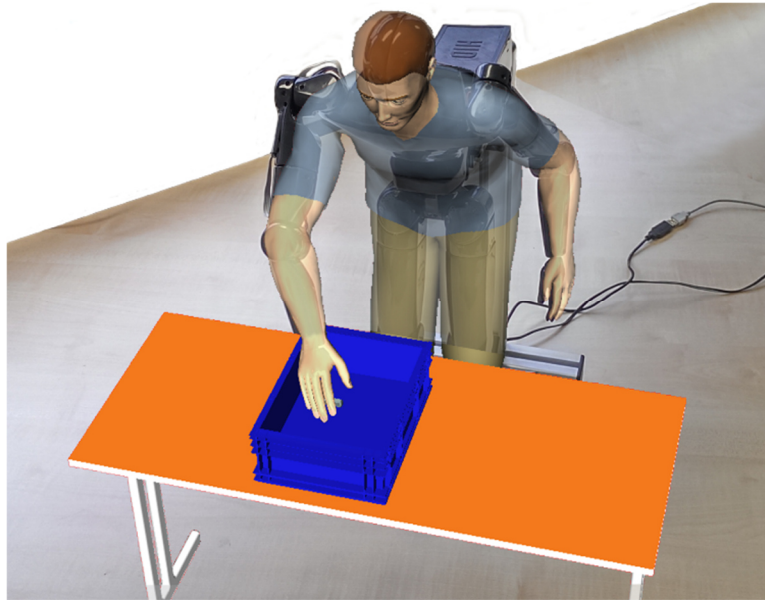


Abbildung 5.26: Tangible User Interface auf Basis des Human Input Device aus Sicht des Benutzers

6 Zusammenfassung und Fazit

Produzierende Unternehmen reagierten auf die geänderten Rahmenbedingungen auf der einen Seite unter anderem mit dem zunehmenden Einsatz rechnergestützter Methoden im Produktionsplanungs- und Gestaltungsprozess, was letztlich zur Einführung der Digitalen Fabrik führte. Auf der anderen Seite reagierten viele Unternehmen auf den Demographischen Wandel, indem die Ergonomie bei der Gestaltung der Arbeitsplätze und –prozesse in den Fokus rückte. Die Schnittmenge beider Themen bildet die Abbildung des Menschen in der Digitalen Fabrik über digitale arbeitswissenschaftliche Menschmodelle bzw. die Ergonomiesimulation. Studien zur Anwendung der Ergonomiesimulation, die aufgeführt wurden, zeigen, dass diese trotz vieler Vorteile relativ selten angewandt wird. Ebenfalls zeigen sie, dass der hohe Zeitbedarf für die Bedienung der größte Nachteil des Einsatzes digitaler, arbeitswissenschaftlicher Menschmodelle ist. Im Kern ist dies durch den komplexen kinematischen Aufbau digitaler Menschmodelle mit ihren vielen Freiheitsgraden begründet. Da es bisher noch nicht zufriedenstellend gelungen ist, Körperhaltungen oder Bewegungen parametrisch zu beschreiben, müssen hierbei die Anwender häufig die Körperhaltung des digitalen Menschmodells über Vorwärtskinematik anpassen, indem jedes einzelne Gelenk gesondert eingestellt wird, was einen hohen Zeitaufwand erfordert. Aus Bereichen außerhalb der Ergonomiesimulation von Produktionsprozessen wurden Graspable und Tangible User Interfaces in Form von Eingabepuppen aufgezeigt, mit denen die kinematische Kette digitaler Modelle manipuliert werden können. Die Arbeit behandelt die Fragestellungen, ob eine solche Benutzungsschnittstelle den Aufwand zur Erstellung der Ergonomiesimulation verringern und wie diese im Detail aufgebaut sein kann.

Hierzu wurde für das digitale Menschmodell *Jack* von *Siemens PLM* eine Eingabepuppe entwickelt – das *Human Input Device*. Mit diesem lässt sich die Körperhaltung des Menschmodells einstellen. In der Arbeit wird initial beschrieben, wie eine solche Benutzungsschnittstelle, auf Basis eines digitalen Menschmodells, zur Simulation von manuellen Produktionsprozessen abgeleitet sein kann.

Um zu evaluieren, ob das *Human Input Device* einen Beitrag dazu leisten kann, dass die Ergonomiesimulation bei der Planung und Gestaltung manueller Arbeitsplätze stärker Anwendung findet, wurden zwei Nutzerstudien durchgeführt, die dessen Gebrauchstauglichkeit im Vergleich zur Maus vergleichen. Die erste Studie wurde mit Laien durchgeführt und beurteilt die Gebrauchstauglichkeit entlang einer Lernkurve bei der Manipulation der Körperhaltung. Aufgrund des experimentellen Charakters konnten die Variablen mit hoher interner Validität erfasst werden. Auf der anderen Seite wurde die zweite Studie mit Experten durchgeführt. Diese betrachtet die Anwendung des *Human Input*

Device im Kontext der Bewegungsgenerierung des Menschmodells. Beides sorgt für eine höhere externe Validität gegenüber der ersten Studie. Das Setup ist dabei allerdings weniger restriktiv, sodass die interne Validität geringer ausfällt. Aufgrund der mehrdimensionalen Beschreibung der Gebrauchstauglichkeit durch die Komponenten Effektivität, Effizienz und Zufriedenstellung fallen beide Ergebnisse der Studien ambivalent aus. Jedoch zeigte die erste Studie eindeutig, dass der Zeitbedarf bei der Verwendung des *Human Input Device* für die Manipulation der Körperhaltung des digitalen Menschmodell signifikant geringer ist als bei der Verwendung der Maus. Ebenfalls schätzten die Experten in der zweiten Studie den Zeitbedarf für die Erstellung von Ergonomiesimulationen unter Verwendung des *Human Input Device* signifikant geringer ein. Diese beiden Aspekte liefern deutliche Hinweise darauf, dass im Allgemeinen durch die Verwendung des *Human Input Device* die Erstellungszeit von Ergonomiesimulationen zur Planung und Gestaltung zukünftiger manueller Arbeitsplätze verringert werden kann. Es gilt jedoch zu beachten, dass bei der Evaluation lediglich ein Menschmodell verwendet wurde, dass anthropometrisch dem 50. Perzentil der deutschen Bevölkerung entspricht. Die Auswirkung auf die Gebrauchstauglichkeit des *Human Input Device* bei der Manipulation der Körperhaltung digitaler, arbeitswissenschaftlicher Menschmodelle mit anderen anthropometrischer Maßen wurde zunächst nicht betrachtet. Gegebenenfalls fallen dabei Effekte geringer oder gar nachteilig aus. Dies müsste für genauere Aussagen gesondert untersucht werden. Sollte dies der Fall sein, könnte eine Lösung sein, Eingabepuppen zusätzlicher anthropometrischer Größen zu verwenden. Etwa dem 5. und 95. Perzentil, nach deren Grenzen manuelle Arbeitsplätze in der Regel ausgelegt werden. Darauf aufbauend wird anschließend zunächst abstrakt skizziert, inwiefern sich die Verwendung des *Human Input Device* in den Planungsprozess manueller Arbeitsplätze eingliedern lässt. Die unterschiedlichen Arten der Bewegungsgenerierung des Menschmodells, in Verbindung mit den unterschiedlichen Eingabegeräten sind sehr vielfältig. Es wird deshalb aus der Evaluation nicht geschlussfolgert, dass in Zukunft stets das *Human Input Device* verwendet werden soll. Vielmehr wird in einer Koexistenz neben den etablierten Verfahren und Eingabegeräten aufgezeigt, wann der Einsatz des *Human Input Device* sinnvoll sein kann. Anschließend werden zusätzlich an verschiedenen Beispielen konkrete Einsatzszenarien des *Human Input Device* aufgezeigt. Zudem werden ausblickend Potenziale dargestellt, mit denen die initial entwickelte Eingabepuppe in Zukunft verbessert werden kann.

Literaturverzeichnis

Aarlt, F.: Untersuchung zielgerichteter Bewegungen zur Simulation mit einem CAD-Menschmodell, Herbert Utz, München (1999)

Abdel-Malek, K.; Jasbir, A.: Physic-Based Digital Human Modeling. Predictive Dynamics. In: Duffy, V. G. (Hrsg.): Handbook of Digital Human Modeling. Research for Applied Ergonomics and Human Factors Engineering. CRC Press. Broken Sound Parkway, NW/Boca Raton, FL (2009), S. 5-1 bis 5-33

Arai, K.: Cyber Bunraku. In: Lynn.P; et al. (Hrsg.): The 24th International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'97). ACM, New York (1997), S. 87

Bauer Consumer Media Ltd.: Cinema's Greatest Effects Shots Picked By Hollywood's Top VFX Specialists. Zugriff am 22.07.2014 unter <http://www.empireonline.com/features/cinemas-greatest-vfx-shots/p11>

Badler, N.: Virtual Humans for Animation, Ergonomics and Simulation. In.: Workshop on Motion of Non-Rigid and Articulated Objects (NAM'97), IEEE Computer Society, Washington, DC (1997), S. 28-36

Bär, T.: Durchgängige Prozesskette vom digitalen Produkt bis zur realen Fabrik? In: Automobil Fachkongress 2004. Digitale Fabrik in der Automobilindustrie; Internationaler Fachkongress am 29. und 30. Juni, Ludwigsburg (2004)

Barakonyi, I.; Schmalstieg, D.: Augmented Reality in the Character Animation Pipeline. In: Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques Conference (SIGGRAPH'06). ACM, New York (2006), Article No. 75

Barakonyi, I.; Schmalstieg, D.: Augmented Reality Agents in the Development Pipeline of Computer Entertainment. In: Kishino, F.; et al.: Entertainment Computing, 4th International Conference (ICEC'05). Springer, Berlin/Heidelberg/New York (2005), S. 345-356

Barnum, C. M.: Usability testing essentials: ready, set...test!. Morgan Kaufmann, Burlington, MA, USA (2011)

Borst, C.; et al.: Observation and Execution. In: Siciliano, B. (Hrsg.): Advanced Bimanual Manipulation. Results from the DEXMART Project. Springer, Heidelberg/New York/Dordrecht/London/New York (2012), S. 59-122

Bracht, U.; et al.: Digitale Fabrik. Methoden und Praxisbeispiele. Springer, Heidelberg/Dordrecht/London/New York (2011)

Bradford Paley, W.: Designing Special-Purpose Input Devices. Computer Graphics 9(1995)H.4, S.55-59

Bubb, H.; Fritzsche, F.: A Scientific Perspective of Digital Human Models: Past, Present and Future. In: Duffy, V.: Handbook of Digital Human Modeling. Research for Applied Ergonomics and Human Factors Engineering. CRC-Press, Broken Sound Parkway, NW/Boca Raton, FL (2009), S. 3-1 bis 3-30

CELSYS, Inc.: Humanoid Input Device – Qumarion. Zugriff am 22.07.2014 unter <http://www.clip-studio.com/quma/en/products/qumarion>

Claus, V.; Schwill, A.: Duden Informatik A-Z. Fachlexikon fürs Studium, Ausbildung und Beruf. Dudenverlag. 4. Aufl., Mannheim [u.a.] (2006)

DIN (Hrsg.): Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten – Teil 11: Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit – Leitsätze. DIN EN ISO 9241-11; Deutsches Institut für Normung e.V./Beuth, Berlin (1998)

DIN (Hrsg.): Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung. DIN EN ISO 9241-110; Deutsches Institut für Normung e.V./Beuth, Berlin (2006)

DIN (Hrsg.): Ergonomie der Mensch-Sytem-Interaktion – Teil 400: Grundsätze und Anforderungen für physikalische Eingabegeräte. DIN EN ISO 9241-400; Deutsches Institut für Normung e.V./Beuth, Berlin (2007)

DIN (Hrsg.): Ergonomie – Körpermaße des Menschen –Teil 2: Werte. DIN 33402-2; Deutsches Institut für Normung e.V./Beuth, Berlin (2005)

Dumas, J. S.; Redish, J.C.: A Practical Guide to Usability Testing. Intellect Books, Revised Edition, Portland, OR, USA (1999)

Ernst H.; et al.: Grundkurs Informatik. Grundlagen und Konzepte für die erfolgreiche IT-Praxis – Eine umfassende, praxisorientierte Einführung. Springer Vieweg, 5. vollständig überarbeitete Aufl., Wiesbaden (2015)

Esposito, C.; et al.: Of Mice and Monkeys: A Specialized Input Device for Virtual Body Animation. In: Symposium on Interactive 3D Graphics (I3D'95). ACM, New York (1995)

Faber, B.: Digitale Fabrik. In: 2. Internationaler Fachkongress Digitale Produktion am 28. und 29. Juni, Ludwigsburg (2005)

Fitzmaurice, G. W.; et al.: Bricks Laying the Foundation for Graspable User Interface. In: Katz, I.; et al.: Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'95). ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., New York (1995), S. 442-449

- Feng, T.-C.; Jiang, B.: Motion Capture Data Retrieval Using an Artist's Doll. In: 19th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'08). IEEE, Piscataway (2008), S. 1-4
- Gläser, D.; et al.: Auf den Spuren der Humanmotorik. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V. (Hrsg.): Gestaltung der Arbeitswelt der Zukunft. Bericht zum 60. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft, GfA-Press, Dortmund (2014), S.363 bis 365
- Göpfert, I.; Schulz, M.: Strategien des Variantenmanagements als Bestandteil einer logistikgerechten Produktentwicklung - Eine Untersuchung am Beispiel der Automobilindustrie. In: Göpfert, I.; et al.: Automobillogistik. Stand und Zukunftstrends. Springer Gabler, 2. Aufl., Wiesbaden (2013), S. 193 – 205
- Groß, J.: Grundlegende Statistik mit R - Eine anwendungsorientierte Einführung in die Verwendung der Statistik Software R. Vieweg und Teubner, Wiesbaden (2010)
- Gudehus, T.: Entwicklung eines Verfahrens zur ergonomischen Bewertung von Montagetätigkeiten durch Motion-Capturing. kassel university press, Kassel (2009)
- Hagen, C.: Cardboard-Engineering und MTM. MTMaktuell (2010) H.4; S. 51 bis 55
- Hayes, C.: Starship Troopers. In The 25th International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'98). ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., New York (1998), S. 311
- Heinecke, A. M.: Mensch-Computer-Evaluation. Basiswissen für Entwickler und Gestalter. Springer, 2. überarbeitete und erweiterte Aufl., Heidelberg/Dodrecht/London/New York (2012)
- Herczeg, M.: Software-Ergonomie. Theorien, Modelle und Kriterien für gebrauchstaugliche interaktive Computersysteme, Oldenbourg, München (2009)
- Hering-Betram, M.: Habilitationsvortrag: Inverse Kinematik in der Computeranimation. TU Kaiserslautern, Zugriff am 9.11.2015 unter http://www-hagen.informatik.uni-kl.de/~bertram/talks/habil_vortrag.pdf
- Hinckley, K.: Hatpic Issues for Virtual Manipulation, University of Virginia, Virginia (1996)
- Holling, Heinz; Gediga Günther: Statistik – Testverfahren. Hogrefe, Göttingen (2016)
- Ishii, H.: Tangible Bits: Beyond Pixels. In: Conference on Tangible and Embedded Interaction (TEI08), ACM, New York (2008), S. XV - XXV

- Ishii, H.; Ullmer, B.: Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces between People, Bits and Atoms. In: Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'97), ACM, New York (1997), S. 234-241
- Jacobs, A.: Wandelbarer Joystick für Animationskünstler. Zugriff am 18.07.2014 unter <https://www.ethz.ch/de/news-und-veranstaltungen/eth-news/news/2014/06/wandelbarer-joystick-fuer-animationskuenstler.html>
- Jacobson, A.; et al.: Tangible and Modular Input Device for Character Articulation. In: ACM Transactions on Graphics (TOG) 33(2014)H.4, ACM, New York
- Jochem, R.; Raßfeld, C.: Qualitätsbezogene Kosten. In: Pfeifer T.; Schmitt, R. (Hrsg.): Masing Handbuch Qualitätsmanagement, Hanser, 6.Aufl., München/Wien, S.92 – 101 (2014)
- Jordan, P. W.: An Introduction to Usability. Taylor & Francis, London, UK (1998)
- Knep, B.: Brian Knep. Zugriff am 16.07.2014 unter <http://www.blep.com/rd/special-effects/dinosaur-input-device/>
- Knep, B.; et al.: Dinosaur Input Device. In: Katz, I.; et al. (Hrsg.): Conference on Human Computing Systems (CHI'95). ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., New York (1995), S. 304-309
- Kühn, W.: Digitale Fabrik. Fabriksimulation für Produktionsplaner. Carl Hanser, München/Wien (2006)
- Kompetenzzentrum für virtuelle Realität und Kooperatives Engineering w.V.: Whitepaper 3D-Menschmodelle Fellbach (2013)
- Law, A. M.; Kelton, W. D.: Simulation Modeling and Analysis. McGraw-Hill, 2. Aufl., New York u.a. (1991)
- Menache, A.: Motion Caputre Primer. In: Computer Animation Complete. All-in-One: Learn Motion Caputre, Chracteristic, Point-Based, and Maya Winning Techniques, Morgan Kaufmann Publishers, Amsterdam/Boston/Heidelberg/London/New York/Oxford/Paris/San Diego/San Francisco/Singapore/Sydney/Tokyo (2010), S. 71 bis 104
- Menges, R.: Synthese und Simulation dreidimensionaler Hand-Arm-Bewegungen an manuellen Montagearbeitsplätzen. In: Warnecke, H.J.; Bullinger, H.-J. (Hrsg.): IPA-IAO Forschung und Praxis. Band 166, Springer, Berlin/Heidelberg (1992)
- Möller, D. P.F.: Modellbildung, Simulation und Identifikation dynamischer Systeme, Springer, Berlin, Heidelberg (1992)

- Mühlstedt, J.: Entwicklung eines Modells dynamisch-muskulärer Arbeitsbeanspruchung auf Basis digitaler Menschmodelle. Universitätsverlag Chemnitz, Chemnitz (2012)
- Mühlstedt, J.; Spanner-Ulmer, B.: Homo Sapiens Digitalis: Über den Praxiseinsatz digitaler Menschmodelle. In: Lichtenstein, A.; et al. (Hrsg.): Der Mensch im Mittelpunkt technischer Systeme. 8. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme. VDI, Düsseldorf (2009), S.7-8)
- Paul, R. P.: Robot Manipulators: Mathematics, Programming and Control. MIT Press, Cambridge, MA (1992)
- Preim, B.; Dachzelt, R.: Interaktive Systeme. Band 2. User Interface Engineering, 3D-Interaktion, Natural User Interface. Springer Vieweg, 2. Aufl., Berlin/Heidelberg (2015)
- Raab-Steiner, E.; Benesch, M.: Der Fragebogen – Von der Forschungsidee zur SPSS-Auswertung, Facultas, 4. Aufl., Wien (2015)
- Rieseler, H.: Roboterkinematik – Grundlagen, Invertierung und Symbolische Berechnung. Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden (1992)
- Robertson, B.: Real troopers. Computer Graphics World 20(1997)H. 9, S.26-34
- Rodríguez Flick, D.: Virtuelle Absicherung manueller Fahrzeugmontagevorgänge mittels digitalem 3-D-Menschmodell – Optimierung der Mensch-Computer-Interaktion. TU München, München (2010)
- Rohrmann, B.: Empirische Studien zur Entwicklung von Antwortskalen für die sozialwissenschaftliche Forschung. Zeitschrift für Sozialpsychologie, 9(1978), S. 222-145
- Schack, R. J.: Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik, Herbert Utz, München 2007
- Sarodnick, F; Braun, H.: Methoden der Usability Evaluation – Wissenschaftliche Grundlagen und praktische Anwendung. Huber, 2. Aufl. Bern, CH (2011)
- Schenk, M.; et al.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Methoden für die wandlungsfähige vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik, Springer Vieweg, 2. Aufl., Berlin/Heidelberg (2014)
- Schnauber, H.: Arbeitswissenschaft, Fried. Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden (1979)
- Schönherr, R.: Simulationsbasierte Absicherung der Ergonomie mit Hilfe digital beschriebener menschlicher Bewegungen. TU Chemnitz, Chemnitz (2014)
- Siemens Software Industries: Jack and Process Simulate. Zugriff am 26.09.2014 unter https://www.plm.automation.siemens.com/de_de/products/tecnomatix/assembly_planning/jack/#lightview-close

- Spur, G.; Krause, F.-L.: Das virtuelle Produkt. Management der CAD-Technik, Hanser, München (1997)
- Statistisches Bundesamt (Hrsg.): Bevölkerung Deutschlands bis 2060 – 13. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung, Wiesbaden (2015)
- Steimle, J.; et al.: Interaction Beyond the Desktop. In: Informatik Spektrum 37(2014) H.5, S. 385
- Tsunoda, Kudo: Legendary partners with Microsoft HoloLens to connect fans with their favorite characters, Zugriff am 08.11.2015 unter <https://blogs.windows.com/devices/2016/08/09/hololens/#KQkkg3jELY0qdOBa.97>
- Van Dam, A.: Post-WIMP user interfaces. In.: CACM. Communications of the ACM 40(1997) H. 2, S.63-67
- VDI (Hrsg.): Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen, Grundlagen. VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1, Verein Deutscher Ingenieure e.V./Beuth, Düsseldorf (2014)
- VDI (Hrsg.): Digitale Fabrik. Grundlagen. VDI-Richtlinie 4499 Blatt 1; Verein Deutscher Ingenieure e.V./Beuth, Düsseldorf (2008)
- VDI (Hrsg.): 2014: Ingenieure auf einem Blick – Erwerbstätigkeit, Migration, Regionale Zahlen, Warlich Druck Meckenheim, Meckenheim (2014)
- VDI (Hrsg.) : Digitale Fabrik. Ergonomische Abbildung des Menschen in der Digitalen Fabrik. VDI-Richtlinie 4499 Blatt 4, Verein Deutscher Ingenieure e.V./Beuth, Düsseldorf (2015)
- Volkswagen AG (Hrsg.): Nicht von Papp. Ein 3P-Workshop in der Lenkungsfertigung hilft, Arbeitsabläufe zu optimieren. In: Volkswagen AG (Hrsg.) Autogramm. Ausgabe 05/2007. Zugriff am 08.08.2017 unter http://autogramm.volkswagen.de/05_07/standorte/standorte_19.html
- Weber, W.: Industrieroboter: Methoden der Steuerung und Regelung. Carl Hanser, 2. Aufl., München (2013)
- Weller, M.P.; et al.: Posey: Instrumenting a Poseable Hub and Strut Construction Toy. In: 2nd International Conference on Tangible and Embedded Interaction (TEI'08). ACM, New York (2008), S. 39-46
- Westkämper, E.: Zukunfts- und Standardsicherung mit Hilfe der Digitalen Fabrik. In: 3. Internationaler Fachkongress Digitale Fabrik in der Automobilindustrie am 23. und 24. Mai, Ludwigsburg (2006)

- Wiegmann, D.; Brüggemann, H.: Entwicklung einer menschenähnlichen Puppe als Eingabegerät für die Menschsimulation. In: Rabe, M.; Clausen, U. (Hrsg.): Simulation in Produktion und Logistik 2015, Fraunhofer, Stuttgart (2015)
- Wiegmann, D.; Brüggemann, H.; Rausch A.: Design and Evaluation of a Human-Like Puppet as an Input Device for Ergonomic Simulation. In: Duffy, V. G. (Hrsg.): 8th International Conference on Digital Human Modeling - Application in Health, Safety, Ergonomics, and Risk Management: Ergonomics and Design (DHM'17). Held as Part of HCI International. Proceedings Part I, Springer, Vancouver (2017), S.393-403
- Wildemann, H. Strategien der Digitalen Fabrik. In: 2. Internationaler Fachkongress Digitale Fabrik in der Automobilindustrie am 28. und 29. Juni, Ludwigsburg (2005)
- Yoshikazi W.; et al.: An Actuated Physical Puppet as an Input Device for Controlling a Digital Manikin. In: Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'11), ACM, New York (2011), S. 637-646
- Wischniewski, S.: Digitale Ergonomie 2025, Bundesamt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund/Berlin/Dresden (2013)
- Zäh, M. F.; et al.: Digitale Fabrik im Gesamtkontext. In: 2. Internationaler Fachkongress Digitale Fabrik in der Automobilindustrie am 28. und 29. Juni, Ludwigsburg (2005)
- Zenner, C.: Durchgängiges Variantenmanagement in der Technischen Produktionsplanung. In: Bley, H.; Weber C. (Hrsg.): Universität des Saarlandes Schriftenreihe Produktionstechnik Band 37, Lehrstuhl für Fertigungstechnik/CAM, Saarbrücken (2006)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Medianalter der Erwerbstätigen von 1950 bis 2060 (20 bis 64 jährig, ab 2014 koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung) (Statistisches Bundesamt, 2015)	1
Abbildung 2.1: Evolution der Digitalen Fabrik (in Anl. an Bär, 2004; Faber, 2005; Spur & Krause, 1997; Westkämper, 2006; Wildemann, 2005; Zäh et al., 2005; zit. nach Schack, 2007)	6
Abbildung 2.2: Fokus der digitalen Fabrik (in Anl. an VDI 4499 Blatt 1)	7
Abbildung 2.3: Aufwandsverlagerung mittels Digitaler Fabrik (in Anl. an Zenner, 2006 und Schenk et al., 2014)	8
Abbildung 2.4: Vorteile der Digitalen Fabrik (in Anl. an Bracht et al., 2011)	8
Abbildung 2.5: Klassifikation Digitaler Modelle (in Anl. an Kühn, 2006)	9
Abbildung 2.6: Klassifizierung der Methoden der Digitalen Fabrik (in Anl. an Bracht et al., 2011)	10
Abbildung 2.7: Werkzeuge der Digitalen Fabrik (in Anl. an Schack, 2007)	11
Abbildung 2.8: Wege ein System zu untersuchen (nach Law und Kelton, 1991)	12
Abbildung 2.9: Aspekte ergonomischer Analysen (in Anl. an VDI 4499-4)	14
Abbildung 2.10: Digitales Menschmodell <i>First Man</i> (links) und <i>Sammie</i> (rechts) (Bubb & Fritzsche, 2009)	15
Abbildung 2.11: Anwendungen, Technologien und Wissenschaften digitaler Menschmodelle (Badler, 1997)	16
Abbildung 2.12: Beschreibungsdimensionen digitaler Menschmodelle (in Anl. an Kompetenzzentrum für virtuelle Realität und Kooperatives Engineering w.V., 2013)	17
Abbildung 2.13: Einteilung der Menschmodelle nach der arbeitswissenschaftlichen Nutzbarkeit (Mühlstedt & Spanner-Ulmer, 2009)	17
Abbildung 2.14: links: Aufbau eines digitalen Menschmodells (Bubb & Fritzsche, 2009), mitte: <i>Jack</i> in segmentierter und weicher Ausführung, rechts: Innere und äußere Version von <i>HumanBuilder</i>	18
Abbildung 2.15: Vereinfachte Schnittdarstellung durch ein Gelenk mit segmentiertem und weichem Übergang	19
Abbildung 2.16: Zusammenfassung der Wirbelsäule als Gelenkgruppe am Beispiel von <i>Jack</i>	20
Abbildung 2.17: Vorwärtskinematik über die Denavit-Hartenberg-Notation (in Anl. an Paul, 1982; zit. nach Rieseler, 1992)	21
Abbildung 2.18: Vorwärtskinematik über die Denavit-Hartenberg-Notation (in Anl. an Paul, 1982; zit. nach Rieseler, 1992)	22

Abbildung 2.19: Unnatürliche Körperhaltungen, die über inverse Kinematik erzeugt wurden, am Beispiel von <i>Jack</i> und <i>HumanBuilder</i>	25
Abbildung 2.20: Haltungsbibliothek des Menschmodells <i>Jack</i>	26
Abbildung 2.21: Bewegungsgenerierung durch Keyframing (Wiegmann & Brüggemann, 2015)	27
Abbildung 2.22: Beispiel Motion Capturing (Siemens Software Industries)	28
Abbildung 2.23: Schematische Darstellung der parametrischen Bewegungsgenerierung	29
Abbildung 2.24: Stand der parametrischen Bewegungsgenerierung (in Anl. an Gläser, 2014)	30
Abbildung 2.25: Methoden zur Absicherung manueller Montagevorgänge (Mehrfachnennung möglich) (in Anl. an Rodríguez, 2010)	31
Abbildung 2.26: Anzahl der Montageuntersuchung im Jahr (in Anl. an Rodríguez, 2010)	31
Abbildung 2.27: Vorteile digitaler Menschmodelle (links: in Anl. an Rodríguez (2010), rechts: in Anl. an Mühlstedt (2012))....	32
Abbildung 2.28: Nachteile digitaler Menschmodelle (oben: in Anl. an Rodríguez (2010), unten: in Anl. an Mühlstedt (2012))	33
Abbildung 2.29: Bedeutung, Häufigkeit der Nutzung und Verbesserungsbedarf von Manipulationsfunktionen digitaler Menschmodelle (in Anl. an Mühlstedt, 2012)	34
Abbildung 2.30: Häufigkeit der Verwendung und Verbesserungsbedarf genutzter Eingabegeräte (in Anl. an Mühlstedt, 2012)	34
Abbildung 2.31: Aufbau von Digitalrechnern nach den Prinzip Eingabe, Verarbeitung und Ausgabe (in Ernst et al., 2015)	36
Abbildung 2.32: Einteilungen von Eingabegeräten (in Anl. an ISO 9241-400)	38
Abbildung 2.33: links: Brick bei der Handhabung, rechts: Manipulation von Lage und Form mittels Bricks (Fitzmaurice et al., 1995)	39
Abbildung 2.34: Vergleich zwischen Graphical User Interface (links) und Tangible User Interface (rechts) (in Anl. an Ishii, 2008)	40
Abbildung 2.35: Simulation von Schattenwurf und Luftströmen von Gebäuden über ein Tangible User Interface (Ishii, 2008)	40
Abbildung 2.36: oben: Das <i>Dinosaur Input Device</i> (Knep, B.), unten: Szene aus dem Film <i>Jurassic Park</i> (Bauer Consumer Media Ltd.)	41
Abbildung 2.37: oben: Filmausschnitt mit einem <i>Bug</i> (Hayes, 1998), unten: Gitternetzlinien des 3D Modells eines <i>Bugs</i> sowie das <i>Digital Input Device</i> (Robertson, 1997)	43
Abbildung 2.38: Das <i>Monkey</i> -Eingabegerät sowie das damit manipulierte Menschmodell (Esposito & Paley, 1995)	44

Abbildung 2.39: <i>Monkey 2</i> (Bradford Paley, 1998).....	44
Abbildung 2.40: Das <i>Cyber-Bunraku</i> -System (Arai, 1997).....	45
Abbildung 2.41: links: Gliederpuppe mit Sensoren, mitte: Gliederpuppe mit überlagerten Animations-Charakter, rechts: Bedienung der Gliederpuppe (Barakonyi & Schmalstieg, 2006).....	46
Abbildung 2.42: oben: <i>Posey</i> bei der Benutzung, unten Skelett-Modell und animiertes Modell eines fiktiven Charakters (Weller et al., 2006)	47
Abbildung 2.43: Aufgenommene Kamerabilder der Gliederpuppe und daraus resultierendes Skelettmodell (Feng & Jiang, 2008)	48
Abbildung 2.44: Eingabegerät und Menschmodell in virtueller Umgebung (Yoshikazi et al., 2011)	49
Abbildung 2.45: Ergebnisse der Nutzerstudie (Yoshikazi et al., 2011).....	50
Abbildung 2.46: links: <i>Qumarion</i> mit Stativ, rechts Qumarion bei der Bedienung (CELSYS, Inc.)	51
Abbildung 2.47: links: Der <i>Wandelbare Joystick</i> bei der Bedienung, rechts: Bildschirmanzeige während Versuch (Jacobson et al., 2014).....	51
Abbildung 2.48: Ergebnisse der Nutzerstudie (Jacobson et al., 2014).....	52
Abbildung 3.1: links: Puppe für Vorabtest, rechts: Übersicht Gelenke und Freiheitsgrade des Eingabegeräts (Wiegmann et al., 2017).....	59
Abbildung 3.2: Skelett zur Steuerung der Körperhaltung des <i>Jack-Modells</i>	60
Abbildung 3.3: Zusammenhang zwischen dem Winkel q_{spine3t2_0} der Wirbelsäule und dem Stellwert f zur Flexion der Wirbelsäule.....	61
Abbildung 3.4: Zusammenhang zwischen dem Winkel q_{clavicle_1} und dem Stellwert l der Schulterbein-Schulter-Gruppe	62
Abbildung 3.5: Zusammenhang zwischen dem Winkel q_{shoulder_0} und den Stellwerten l und a der Schulterbei-Schulter-Gruppe.....	62
Abbildung 3.6: Zusammenhang zwischen dem Winkel q_{shoulder_2} und den Stellwerten l und a der Schulterbei-Schulter-Gruppe bei $t = 0$	63
Abbildung 3.7: Zusammenhang zwischen dem Winkel q_{shoulder_2} und dem Stellwert t der Schulterbei-Schulter-Gruppe bei $l = 0$ und $a = 0$	63
Abbildung 3.8: Ermittlung der Gelenkachse für die Beugung (Flexion) der Wirbelsäule	65
Abbildung 3.9: Ermittlung der Gelenkachse für das Anheben (Abduction) des Armes.....	65
Abbildung 3.10: Skelett des <i>Jack-Modells</i> (links) im Vergleich zum Skelett der Eingabepuppe (rechts)	66
Abbildung 3.11: Darstellung Drehgeber und Dekodierung des Winkels aus dessen Signalen..	67
Abbildung 3.12: Montagereihenfolge und Schnittdarstellung (Wiegmann et al., 2017) des Gelenklagers.	68

Abbildung 3.13: links: Gelenk mit einem Freiheitsgrad am Beispiel des Ellbogengelenks, rechts: Gelenk mit drei Freiheitsgraden am Beispiel des Hüftgelenks.....	69
Abbildung 3.14: <i>Jack-Modell</i> im Vergleich zur Eingabepuppe (Wiegmann et al., 2017).....	70
Abbildung 3.15: Schaltplan für Platine zur Auswertung und Weitergabe der Sensorwinkel...	71
Abbildung 3.16: Ansicht von oben (links) und von unten (rechts) der Platine.....	71
Abbildung 3.17: Schaltplan für Platine zur Auswertung und Weitergabe der Sensorwinkel...	72
Abbildung 3.18: Layout Platine mit Master-Mikrocontroller.....	72
Abbildung 3.19: Member der Klasse <i>HID</i> und <i>HIDJoint</i> sowie Beschreibung der Enum <i>HIDJointstatus</i>	73
Abbildung 3.20: Ablauf der Methode <i>UpdatePosture</i> (links) und Beschreibung der Klasse <i>HIDCmd</i> (rechts).....	75
Abbildung 3.21: Einsatz der Eingabepuppe mit Stativ am Computer-Arbeitsplatz	75
Abbildung 3.22: Grafische Benutzungsschnittstelle des Plugins, links: Gelenke teilweise referenziert, rechts: Gelenk vollständig referenziert.....	76
Abbildung 3.23: Bedienung der Eingabepuppe und korrespondierendes <i>Jack-Modell</i> (Wiegmann et al., 2017).....	77
Abbildung 3.24: Vereinfachtes Regelkreis-Modell für die Einstellung der Körperhaltung des Jack-Modells mit der Eingabepuppe	77
Abbildung 3.25: Platzieren des <i>Jack-Modells</i> über den <i>Placement Manipulator</i>	78
Abbildung 3.26: Zeitpunkt der Simulation eines Aufnehmen-und-Platzziervorgangs.....	79
Abbildung 4.1: Anwendungsrahmen für Gebrauchstauglichkeit (in Anl. an ISO 9241-11)	83
Abbildung 4.2: Die fünf Komponenten der Gebrauchstauglichkeit entlang der Lernkurve (in Anl. an Jordan, 1998).....	84
Abbildung 4.3: Evaluation der Gebrauchstauglichkeit (in Anl. an Sarodnick & Brau, 2011; Jordan, 1998; Barnum, 2011; Dumas & Redish, 1999)	86
Abbildung 4.4: Gebrauchstauglichkeit bei der Ergonomiesimulation (in Anl. an ISO 9241-11)	87
Abbildung 4.5: Ausgangs- und Zielpose der ersten Arbeitsstation (Wiegmann et al., 2017)...	90
Abbildung 4.6: Übersicht der Arbeitsstationen und Zielposen des Experiments (in Anl. an Wiegmann et al., 2017).....	91
Abbildung 4.7: Vereinfachte Darstellung der Abbruchkriterien, links: Kriterium 1, rechts: Kriterium 2.....	93
Abbildung 4.8: Ausbalancierung des Effekts der Reihenfolge auf die unabhängigen Variablen (in Anl. an Wiegmann et al., 2017).....	95
Abbildung 4.9: Ersatzbewegung des Human Input Device zur Flexion der Schulter.....	97
Abbildung 4.10: Einstellen der Körperhaltung des <i>Jack-Modells</i> über Vorwärts-(oben) und inverser Kinematik (unten).....	98

Abbildung 4.11: Ähnliche Anordnung von Monitor und Human Input Device während der Durchführung	99
Abbildung 4.12: Mittelwerte der Zeitbedarfe t mit Konfidenzintervallen ($\alpha = 5\%$) je Durchgang und Eingabegerät (in Anl. an Wiegmann et al., 2017)	100
Abbildung 4.13: Mittelwerte der Abweichungen g mit Konfidenzintervallen ($\alpha = 5\%$) je Durchgang und Eingabegerät (in Anl. an Wiegmann et al., 2017)	100
Abbildung 4.14: Mittelwerte der Zufriedenstellung z mit Konfidenzintervallen ($\alpha = 5\%$) je Durchgang und Eingabegerät (in Anl. an Wiegmann et al., 2017)	101
Abbildung 4.15: Ausgangssituation des Szenarios	107
Abbildung 4.16: Hinlangen zum Lenkgetriebe über die Funktion <i>Auto Grasp</i>	111
Abbildung 4.17: Dialogfenster und charakteristische Szenen zum Platzieren des Lenkgetriebes.....	112
Abbildung 4.18: Hinlangen zum Lenkgetriebe über Vorwärtskinematik	113
Abbildung 4.19: Pose zur Aufnahme des Lenkgetriebes (links), Gehbewegung über <i>Walk Creator</i> (rechts).....	114
Abbildung 4.20: Zielpose zum Ablegen des Lenkgetriebes	114
Abbildung 4.21: Hinlangen zum Lenkgetriebe mit dem <i>Task Simulation Builder</i>	115
Abbildung 4.22: Anlegen des <i>Put Task</i> zum Ablegen des Lenkgetriebes.....	115
Abbildung 4.23: Korrigierte Endposition der Gehoperation und Zielpose bei der Ablage des Lenkgetriebes.....	116
Abbildung 4.24: Kollision zwischen Werkstückträgern, Lenkgetriebe und Menschmodell bei Bewegungsgenerierung durch inverse Kinematik.....	117
Abbildung 4.25: Kollision zwischen Werkstückträgern, Lenkgetriebe und Menschmodell bei parametrischer Bewegungsgenerierung.....	117
Abbildung 4.26: Bewertungsverteilung der Stichprobe zu den Aussagen Nr.1-3 des Fragebogens.....	119
Abbildung 5.1: Möglichkeiten der Bewegungsgenerierung von arbeitswissenschaftlichen Menschmodellen	124
Abbildung 5.2: Ergonomiesimulation im Produktentwicklungsprozess der Automobilindustrie (in Anl. an Göpfert und Schulz, 2013)	125
Abbildung 5.3: Anwendung der Eingabepuppe bei der Generierung von Bewegungen.....	128
Abbildung 5.4: Änderung einer parametrisch generierten Bewegung über eine Zwischenpose	129
Abbildung 5.5: Ausgangsdarstellung des Keyframing-Beispiels.....	130
Abbildung 5.6: Parametrisch erzeugte Zielpose.....	131
Abbildung 5.7: Erste Zwischenpose.....	131

Abbildung 5.8: Zweite Zwischenpose.....	132
Abbildung 5.9: Zielpose.....	132
Abbildung 5.10: Diskretisierte Bewegung (Keyframes: durchgezogener Rahmen, interpolierte Frames: gestrichelter Rahmen)	133
Abbildung 5.11: Anlegen eines <i>Get Task</i> (links) und Generierung einer Gehbewegung (rechts)	134
Abbildung 5.12: Automatisch erzeugte Hinlangbewegung zur Schraube	134
Abbildung 5.13: Verwendung des Human Input Device zur Definition einer Zwischenpose .	135
Abbildung 5.14: Mit Motion Capturing erstellte Geh- und anschließender Hinlangbewegung.....	136
Abbildung 5.15: Definition der Keyframes für das Hinlangen zum Bauteil mit dem <i>Human</i> <i>Input Device</i>	137
Abbildung 5.16: Ablauf nach Änderung.....	138
Abbildung 5.17: 3P-Workshop in der Lenkungsfertigung bei Volkswagen (Volkswagen, 2007).....	139
Abbildung 5.18: Kugelgelenk mit Erfassung nach dem Prinzip einer optischen Computermouse	140
Abbildung 5.19: Änderung der Förderhöhe des Lenkgetriebes.....	141
Abbildung 5.20: Anpassung der Zielpose durch Änderung der Ausgangspose	141
Abbildung 5.21: Anpassung einer Zielpose mit der Eingabepuppe.....	142
Abbildung 5.22: Anpassung einer Zielpose mit einer angetriebenen Eingabepuppe.....	143
Abbildung 5.23: Force Feedback über die Eingabepuppe und der Bewertung nach der <i>OWAS-Methode</i>	144
Abbildung 5.24: Blickverschieben zwischen Eingabepuppe und Bildschirm bei der Bedienung.....	145
Abbildung 5.25: Anwendung der <i>Microsoft HoloLens</i> bei der Erstellung eines 3D-Charakters (Tsunoda)	146
Abbildung 5.26: Tangible User Interface auf Basis des Human Input Device aus Sicht des Benutzers.....	147